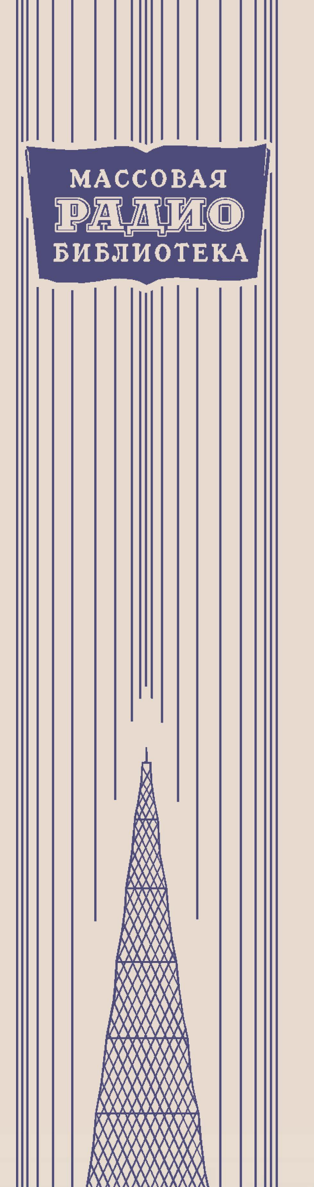
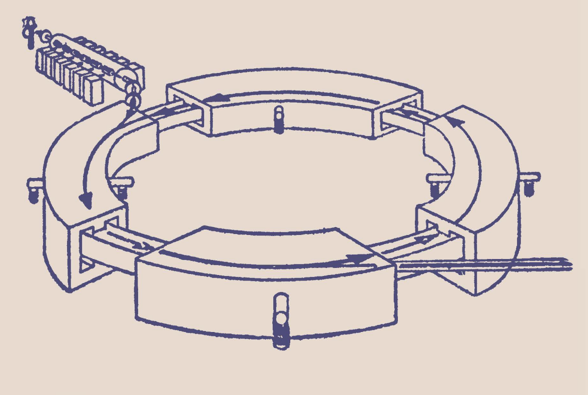


Г. И. ЖИЛЕЙКО

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

К ЧИТАТЕЛЯМ

Выпуски Массовой радиобиблиотеки служат важному делу пропаганды радиотехнических знаний среди широких слоев населения нашей страны и способствуют развитию радиолюбительства. В свете этих задач большое значение имеет привлечение радиолюбительской общественности к критике каждой вышедшей книги и брошюры.

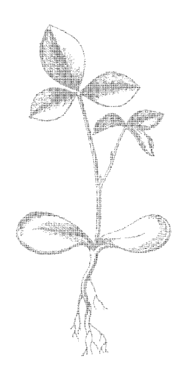
Редакция Массовой радиобиблиотеки обращается к читателям данной книги с просьбой прислать свои отзывы, пожелания и замечания вместе с краткими сообщениями о своем образовании, профессии, возрасте и радиолюбительском опыте по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, д. 10 — Редакция Массовой радиобиблиотеки Госэнергоиздата.

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 317

Г. И. ЖИЛЕЙКО

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

В книге приводятся основные сведения о методах ускорения заряженных частиц, об ускорителях и их радиотехнических устройствах.

Книга рассчитана на подготовленного читателя, интересующегося проблемами современной науки.

Жилейко Георгий Иванович

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Редактор | *П. О. Чечик* | Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 16/VI 1958 г. Подписано к печати 2 XII 1958 г.
Т-11662. Бумага 84×108[1]/[32] 3,28 печ. л. Уч.-изд. л. 3,6
Тираж 30 000 экз. (1-й завод 10 000 экз.) Цена 1 р. 45 к. Зак. 1306.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Все вещества, окружающие нас, делятся на два типа: простые и сложные. Простыми веществами являются такие, которые не могут быть разделены никакими химическими реакциями на еще более простые. Эти вещества называются элементами. К ним относятся, например, все металлы и некоторые газы. Такие вещества, как вода, стекло, дерево, бумага, являются сложными и могут быть разложены химическими реакциями на более простые.

Сложных веществ, известных науке, очень много, а простых, встречающихся в природе, существует 92.

Химические реакции между веществами достаточно хорошо изучены. Определено строение очень многих сложных веществ. В то же время оставалась загадочной способность элементов не поддаваться изменениям в любых достижимых лабораторных условиях.

Только за последние 40—45 лет сложились основные понятия о строении простых веществ, объясняющие их особенности. Появилась новая отрасль физики, изучающая строение мельчайшей неделимой части простого вещества — атома.

Строение атома представляется сейчас в следующем виде. Атом элемента состоит из ядра, вокруг которого обращаются электроны, образующие электронную оболочку атома.

Все химические реакции происходят за счет взаимодействия между электронными оболочками отдельных атомов. Ядро атома — сложное образование, состоящее из протонов и нейтронов. Количество протонов в ядре определяет химические свойства элемента. В периодической таблице Менделеева элементы расположены в порядке возрастания их атомного веса (количества протонов в ядре) и обнаруживают периодическое повторение их типичных химических свойств.

Если электронная оболочка атома легко может быть изменена и даже разрушена, что и происходит при химических реакциях, то ядро является чрезвычайно устойчивой частицей. Поэтому все усилия средневековых алхимиков изменить число протонов в ядре, т. е. изменить элемент, превратить железо или свинец в золото, оказались тщетными.

Наука о ядре атома — ядерная физика — изучает превращения, происходящие внутри ядра, исследует его свойства и свойства частиц, из которых оно состоит. Развитие этой науки за последние годы позволило перейти к использованию самого мощного источника энергии — энергии атомного ядра.

При изучении механизма ядерных процессов необходимо иметь возможность воздействовать на ядро и наблюдать результаты этого воздействия. Таким способом воздействия на ядро атома является бомбардировка его ядрами других атомов. Чтобы эффективно подействовать на изучаемое ядро, бомбардирующие ядра должны иметь значительную энергию, т. е. обладать большой скоростью.

Для физических опытов с атомным ядром применяются быстро летящие или, как говорят физики, ускоренные ядра простейших атомов, ускоренные электроны и нейтроны. В последнее время ускоренные электроны получили широкое применение в технике, медицине и промышленности.

Для того, чтобы разогнать, т. е. ускорить, бомбардирующие ядра или электроны, необходимо создать приборы, в которых ядра и электроны могли бы увеличивать свою скорость. Такие приборы называются ускорителями заряженных частиц.

Ускоритель заряженных частиц любого типа — это сложное, часто громоздкое сооружение со множеством разнообразных устройств, управляющих его работой. Одной из важнейших частей ускорителя является его радиотехническое устройство. Радиотехника сыграла огромную роль в создании и развитии ускорителей.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

Электроны и ядра атомов — это элементарные частицы, несущие некоторый электрический заряд.

Физики используют в своих опытах ядра водорода — протоны, ядра «тяжелого» водорода (изотопы обычного водорода) — дейтроны, ядра гелия — альфа-частицы, электроны и нейтроны, образующиеся в результате распада ядер атомов при некоторых ядерных реакциях.

Любая заряженная частица — ион, ядро атома, электрон или даже маленькая капля масла, несущая на себе электрический заряд,— будет реагировать на наличие элекрического или магнитного поля.

В электрических полях заряженная частица изменяет свою скорость, увеличивая или уменьшая ее. Нарастание или падение скорости частицы в электрическом поле зависит от его направления и напряженности. Если в электрическое поле поместить электрон — отрицательно заряженную частицу, то он будет двигаться к положительному заряду, образовавшему совместно с отрицательным зарядом электрическое поле. При желании ускорить какую-нибудь положительно заряженную частицу, например протон, в том же направлении необходимо изменить знаки зарядов.

Чем больше будет напряженность электрического поля, тем сильнее будет ускоряться частица. Если заряженная частица под воздействием электрического поля начинает двигаться, увеличивая свою скорость, то такой процесс называется ускорением заряженных частиц. Ускорение частиц происходит только при помощи электрических полей.

При увеличении скорости любого движущегося тела увеличивается его кинетическая энергия. Зависимость

кинетической энергии от скорости тела описывается формулой

$$W = \frac{mv^2}{2},$$

где W — кинетическая энергия тела; m — его масса, а v — скорость.

Для заряженной частицы очень удобной оценкой ее кинетической энергии служит величина, показывающая, какой разностью потенциалов (каким напряжением) ускорилась частица. За единицу энергии принимается величина энергии, которую приобретает частица с зарядом, равным заряду электрона, при разности потенциалов 1 *в*. Называется эта единица «электроновольт» и обозначается *эв*. Так, если электрон ускоряется 100 *в*, то его энергия будет равна 100 *эв*; если протон ускоряется 100 *в*, то энергия протона будет равна 100 *эв*; дейтрон, ускоренный 100 *в*, будет иметь энергию 200 *эв*, так как его заряд равен по величине двум зарядам электрона. Миллион электроновольт обозначается *Мэв*.

Связь между скоростью частицы v и кинетической энергией, выраженной в электроновольтах, определяется следующей формулой:

$$v\,(км/сек) = c\sqrt{1 - \left(\frac{W_0}{W + W_0}\right)^2}, \qquad (1)$$

где c — скорость света (c=300 тыс. *км/сек*); W — кинетическая энергия частицы, *эв*; W_0 — постоянная величина, характеризующая частицу (так называемая энергия покоящейся частицы), равная для протона $938 \cdot 10^6$ *эв*, для электрона — $0{,}51 \cdot 10^6$ *эв*, для дейтрона — $1\,877 \cdot 10^6$ *эв* и для альфа-частицы — $3\,733 \cdot 10^6$ *эв*.

Из формулы (1) видно, что с увеличением энергии частицы W скорость v растет вначале быстро, а при W, значительно большем W_0, она увеличивается все медленнее, приближаясь в пределе к срокости света. Легко видеть, что при энергии электрона свыше 2 *Мэв* его скорость почти достигает скорости света и при дальнейшем увеличении энергии растет очень медленно (рис. 1). Для протона такое состояние наступает лишь при энергии 4 000 *Мэв*.

Для физических исследований необходимы частицы, движущиеся со скоростями до 100—300 тыс. *км/сек*. Такие скорости частицы могут получить при прохождении разно-

сти электрических потенциалов в сотни миллионов и миллиарды вольт. Соответственно энергии частиц будут равны сотням миллионов и миллиардам электроновольт. Для получения заряженных частиц с такими высокими энергиями и предназначаются ускорители.

Если движущаяся заряженная частица попадает в магнитное поле, то под действием силы Лоренца траектория ее движения искривляется. В зависимости от направления

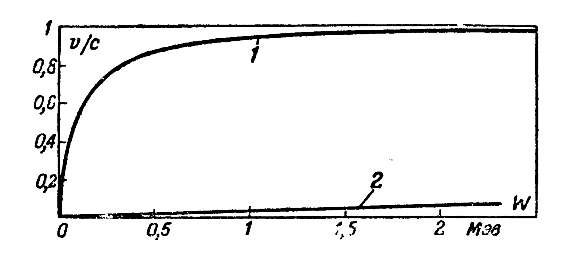


Рис. 1. Относительная скорость электрона *1* и протона *2* в зависимости от энергии.

первоначального движения траектория частицы в магнитном поле может быть весьма сложной. В частном случае траектория может превратиться в спираль или окружность. Если частица движется в магнитном поле в плоскости, перпендикулярной силовым линиям поля, то траекторией частицы является окружность радиуса R, определяемого как

$$R\,(м) = \frac{\sqrt{W\,(W + 2W_0)}}{300H}, \qquad (2)$$

где W — энергия частицы, *эв*; H — магнитное поле, *э*.

Частица совершает движение по окружности и ее частота обращения

$$f = \frac{v}{2\pi R} = a\,\frac{H}{m}, \qquad (3)$$

где a — постоянная величина.

Магнитное поле не изменяет энергии движущихся частиц и воздействует только на траекторию их движения. В ускорителях магнитное поле применяется как средство, управляющее направлением движения ускоряемых частиц в нужной для ускорения форме. Как это делается, будет показано ниже.

Из теории относительности известно, что при увеличении скорости любого тела его масса m растет по закону

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \qquad (4)$$

где m_0 — масса покоящегося тела.

Так как ускоренные частицы имеют скорости, близкие к скорости света, увеличение массы частицы может быть значительным. Изменение массы частицы влияет на процессы ускорения и поэтому должно учитываться при изучении работы ускорителей. Действительно, частота обращения частицы, определяемая формулой (3), будет зависеть от изменения массы m.

Условия ускорения частицы таковы, что необходимо точное следование частицы по определенной траектории. Только в этом случае частицы получат необходимый прирост энергии и смогут быть выведены из ускорителя для использования. Даже при малом нарушении траектории частица может выпасть из нормальных условий ускорения и будет потеряна.

При ускорении в ускорителе частица проходит громадное расстояние, достигающее в крупных современных ускорителях многих сотен тысяч километров. На таком пути очень вероятны нарушения траектории частицы. Они происходят по многим причинам. Частица может отклониться от необходимой траектории вследствие небольшого изменения ускоряющего напряжения, напряженности магнитного поля, от столкновения с молекулами газа и пр. Одной из основных задач теории ускорителей является изучение возможностей устойчивого движения ускоряемых частиц на всей траектории их движения в ускорителе. Рассматриваются два вида устойчивости движения: в продольном направлении, т. е. вдоль траектории, и в поперечном направлении, т. е. в направлении, перпендикулярном движению.

Если частица вследствие каких-либо причин начинает двигаться быстрее или медленнее, чем необходимо для нормального процесса ускорения, то может нарушиться продольная устойчивость движения и частица будет потеряна. То же произойдет при отклонении частицы от траектории в какую-либо сторону.

Работа всех современных ускорителей основана на принципе устойчивого продольного движения частиц, назы-

ваемом автофазировкой. Этот принцип был открыт советским физиком В. И. Векслером и несколько позже и независимо от него американским ученым Мак-Милланом.

Принцип автофазировки заключается в том, что ускоряемые частицы группируются в процессе ускорения в сгустки частиц вокруг одной частицы, которая находится в самых благоприятных условиях ускорения. Такую частицу принято называть равновесной. Для остальных частиц условия ускорения менее благоприятны, вследствие чего в их продольном движении возникают малые возмущения. Частицы, продолжая ускоряться, начинают совершать небольшие колебания около частицы с благоприятными условиями ускорения. Скорость или энергия частиц во время ускорения будет несколько меняться, то увеличиваясь, то уменьшаясь. Это схематически показано на рис. 2. Отметим, что величины отклонений скорости и энергии очень невелики.

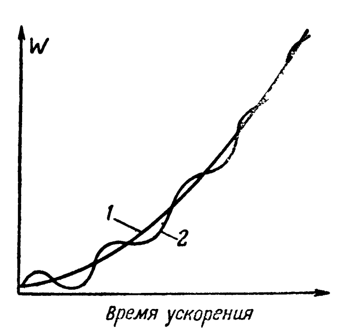


Рис. 2. График, поясняющий действие автофазировки.

1 — нарастание энергии равновесной частицы; *2* — нарастание энергии неравновесной частицы.

При движении заряженных частиц с ускорением возникает электромагнитное излучение. Частицы излучают широкий спектр колебаний, включая видимый свет. Излучение тем больше, чем выше скорость и ускорение частицы. Особенно сильное излучение будет возникать при движении ускоренных электронов по окружности, так как электроны быстро набирают скорость, близкую к скорости света. При проектировании электронных ускорителей приходится учитывать это явление и принимать меры для компенсации потерь энергии электроном на излучение.

2. УСКОРЕНИЕ ПОСТОЯННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Если между двумя электродами (рис. 3) приложить постоянную во времени разность потенциалов (постоянное напряжение U), а на отрицательном электроде поместить источник электронов (например, накаленный катод), то электроны, двигаясь под действием электрического поля от отрицательного электрода к положительному, будут при этом ускоряться. При желании ускорить протоны необхо-

димо изменить полярность напряжения на электродах и источник протонов поместить на положительном электроде.

В ускорителе имеются электроды, на которые подается напряжение, создающее электрическое поле. Это поле и ускоряет частицы.

Схема простейшего ускорителя этого типа показана на рис. 4. Ускоритель состоит из трех основных узлов: источника постоянного напряжения, ускорительной трубки из изоляционного материала, чаще всего стекла, фарфора или

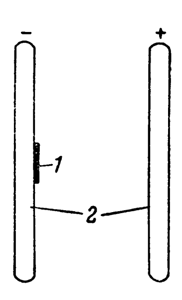


Рис. 3. Схема ускорения электронов.

1 — источник электронов; *2* — плоские электроды.

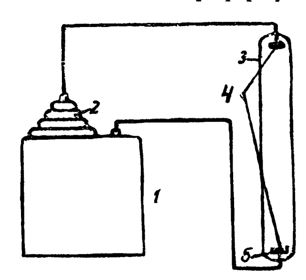


Рис. 4. Схема ускорителя с постоянным напряжением (масштабы на рисунке не соблюдены).

1 — источник постоянного высокого напряжения, *2* — высоковольтный изолятор; *3* — ускорительная трубка; *4* — ускорительные электроды; *5* — источник частиц.

кварца, и источника частиц Из ускорительной трубки откачивается воздух, чтобы при движении ускоряемых частиц они не сталкивались с молекулами газов. В трубке помещаются ускорительные электроды.

Главной частью ускорителя, определяющей техническую возможность его осуществления, является источник постоянного ускоряющего напряжения. Основная трудность сооружения такого источника заключается в необходимости обеспечить надежную изоляцию между проводниками с высоким напряжением и металлическими частями установки, обычно заземленными. Определим минимальное расстояние между высоковольтным проводником и заземленным корпусом, полагая, что допустимая величина напряжения, приходящаяся на 1 *мм* расстояния в воздухе, равна 1 000 *в*. Тогда для напряжения 1 млн. *в* минимальное расстояние будет:

$$\frac{1 \cdot 10^6\,(в)}{1 \cdot 10^3\,(в/мм)} = 1 \cdot 10^3\ мм,$$

или 1 *м*. Для 10 млн. *в* это расстояние между высоковольтным выводом и корпусом должно быть уже 10 *м*.

Кроме того, для уменьшения электрической короны на проводниках сами проводники надо делать больших размеров, например в виде шара. Такой шар с напряжением 4—5 млн. *в* должен иметь даметр порядка 2—3 *м*. Пример такого устройства можно видеть на рис. 5.

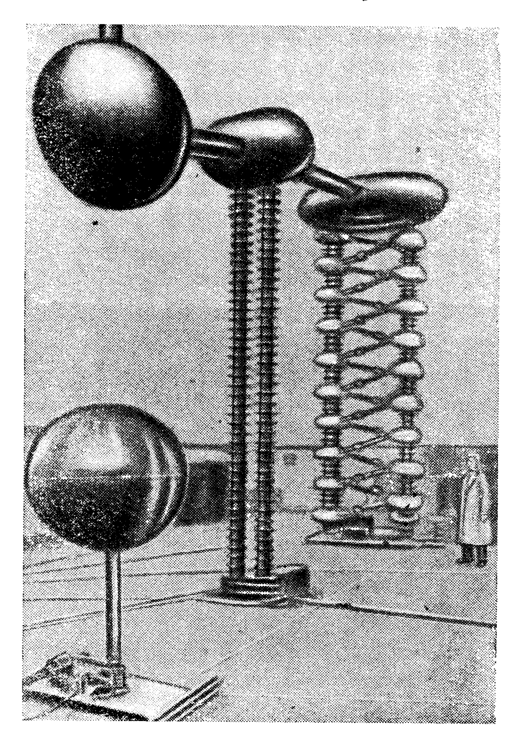


Рис. 5. Высоковольтная установка ускорителя постоянного напряжения.

Самым простым способом получения высокого постоянного напряжения является выпрямление переменного напряжения при помощи кенотронов с последующим применением различных вариантов схем удвоения. Практически такой способ получения высоких напряжений пригоден лишь до 1,5—2 млн. *в*.

Для получения высокого импульсного напряжения широко используется схема (рис. 6), в которой несколько

конденсаторов параллельно заряжается от источника постоянного напряжения U_1, а разряжается последовательно на нагрузку $R_н$ через искровые промежутки $П_1$ и $П_2$. Для схемы на рис. 6 напряжение на нагрузке $U_2=3U_1$. В закорачивающихся промежутках могут быть установлены любые разрядные приборы: искровой разрядник, вакуум-

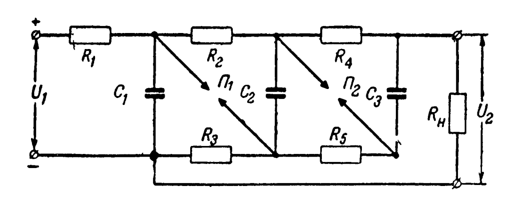


Рис. 6. Схема получения импульсных напряжений до 10 млн. *в*.

ный разрядник с поджигом, тиратрон или электронная лампа. Такие схемы применяются в многих приборах и, в частности, в радиолокационных передатчиках. На этой схеме возможно получать напряжения до 10 млн. *в* и даже несколько выше.

Чаще всего в качестве источника постоянного высокого напряжения в ускорителях применяется электростатический генератор. В электростатическом генераторе используется принцип накопления заряда на шаре путем постепенного добавления небольших количеств электричества. Схема генератора приведена на рис. 7. Источник малого постоянного напряжения заряжает через щетку ленту, которая движется и доставляет заряд к шару. На шаре заряды накапливаются и его потенциал можно повысить до весьма высокой величины. Максимальный потенциал шара будет определяться утечками за счет короны и несовершенства изоляции. Практически напряжения в электростатических генераторах достигают нескольких миллионов вольт. Размеры таких генераторов достигают нескольких метров и даже десятков метров.

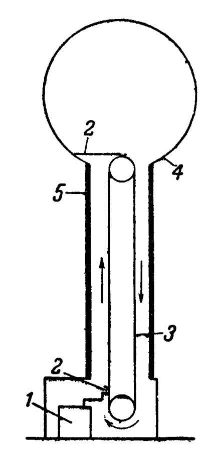


Рис. 7. Схема электростатического генератора Ван де Граафа.

1 — источник малого постоянного напряжения; *2* — щетки; *3* — лента; *4* — шар; *5* — изолятор.

Из изложенного очевидно, что как источники постоянного напряжения для ускорителей, так и сами ускорители могут быть построены только до нескольких миллионов вольт, причем сооружения эти громоздки и трудно управляемы.

3. УСКОРЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Если к электродам (рис. 3) приложить переменное напряжение, то электроны будут ускоряться только при соответствующей полярности электродов и не будут ускоряться при противоположной. Мы получим импульсы ускоренных электронов. Все электронные лампы устроены по этому принципу и являются маленькими ускорителями электронов. При помещении на электроде источника протонов, дейтронов или альфа-частиц получим ускоритель для положительно заряженных ионов.

Рис. 8. Схема трансформатора Тесла.
1 — источник питания; *2* — искровой промежуток.

Первые ускорители с использованием переменного ускоряющего напряжения по сути дела мало отличались от ускорителей с постоянным напряжением. Одной из простейших конструкций может служить ускоритель, состоящий из вакуумной ускорительной трубки и высоковольтного трансформатора. Здесь отсутствуют выпрямляющие устройства, что упрощает всю установку.

Можно использовать трансформатор с разомкнутым сердечником, который питается прерывистым током. На вторичной обмотке трансформатора получаются импульсы высокого напряжения. Это устройство, известное под названием «индуктор», может давать напряжение до 1 млн. *в*. Обычный трансформатор на такое напряжение имеет гораздо бóльшие объем, вес и стоимость.

Для получения высоких напряжений применялись трансформаторы Тесла (рис. 8), которые состоят из двух высокочастотных настроенных контуров с индуктивной связью, в которых емкости имеют разные величины. Если искрой возбуждать контур с большой емкостью, то в контуре с малой емкостью будет возникать высокое напряжение. С трансформаторами Тесла, помещенными в масло, были построены ускорители, при помощи которых удавалось достичь напряжений 2—3 млн. *в*.

Применялись также резонансные трансформаторы, представляющие собой катушку из нескольких витков провода,

напряжение в которой возбуждается автогенератором. Катушка одним концом подключается к корпусу ускорителя, а второй ее конец свободен. Длина провода катушки выбирается равной четверти длины волны возбуждаемых в ней высокочастотных колебаний. При этом катушка является настроенным резонансным контуром и на ее свободном конце развивается высокое напряжение, которое используется для ускорения частиц. Таким способом были достигнуты напряжения до 850 *кв*.

Из этих примеров видно, что использование переменного напряжения в таком виде хотя и дает выигрыш в размерах

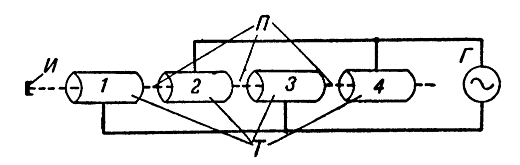


Рис. 9. Принципиальная схема ускорения частиц малым переменным напряжением (линейное ускорение).

И — источник заряженных частиц; *Т* — трубки; *П* — промежутки; *Г* — генератор.

и весе установок, но далеко не обеспечивает нужных напряжений в сотни миллионов вольт.

Выход из создавшегося положения был найден в многократном использовании относительно малого напряжения и суммировании его для получения необходимого высокого.

Принцип действия современных ускорителей основан на многократном использовании для ускорения частиц малой, технически осуществимой разности электрических потенциалов. На схеме на рис. 9 показано устройство, состоящее из источника заряженных частиц, трубок, сквозь которые пролетают частицы, и генератора переменного напряжения. Роль ускоряющих электродов выполняют трубки.

Процесс ускорения протекает следующим образом. Когда частица движется в трубке, то на нее никакие электрические поля не действуют. Если в то время, когда частица попадает в промежуток между трубками *1—2*, напряжение между ними будет ускоряющим, то частица ускорится. Попав внутрь трубки *2*, частица опять не будет испытывать действия напряжения генератора, так как электрическое поле внутри трубки отсутствует. За время пролета частицы в трубке *2* напряжение генератора изменится и ко времени вылета частицы из трубки *2* оно должно быть снова уско-

ряющим уже в промежутке между трубками *2—3* и т. д. Можно подобрать частоту напряжения генератора, длину трубок и расстояние между ними так, что будут соблюдены условия для ускорения частиц по всей длине ускорителя. Частица получит приросты энергии во всех промежутках. Общее ускоряющее напряжение складывается из малых приростов напряжения, каждый из которых равен напряжению на промежутке. Предположим, что напряжение на каждом промежутке равно 100 *кв*. Тогда при десяти промежутках частица ускорится до 1 000 *кв*.

При описанном способе ускорения не все частицы, вылетевшие из источника, будут ускоряться. Когда в промежутках между трубками переменное напряжение таково, что оно не ускоряет, а замедляет частицы, проходящие в этот момент промежуток, то такие частицы выпадают из процесса ускорения и не могут быть использованы. Они теряются внутри ускорителя, оседая на стенки. Ускоритель с использованием переменного напряжения дает ускоренные частицы в виде импульсов.

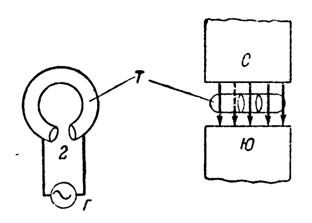


Рис. 10. Принципиальная схема ускорения частиц малым переменным напряжением в присутствии магнитного поля (циклическое ускорение). *Т* — трубка; *Г* — генератор.

Можно показать, что подобная схема ускорения будет наиболее эффективной и технически приемлемой при работе генератора переменного напряжения на метровых, дециметровых и сантиметровых волнах. О таких ускорителях речь будет идти ниже.

Изменим схему на рис. 9 следующим образом. Возьмем трубку (рис. 10) и согнем ее в кольцо. В трубку поместим источник заряженных частиц, а к щели, образовавшейся между концами трубки, приложим переменное напряжение. Далее, поместим трубку в магнитное поле. В магнитном поле траектория движущейся заряженной частицы искривляется и может, в частности, принять форму окружности. Ускорение частиц происходит так же, как и в предыдущем случае. Необходимо только обеспечить соответствие частоты генератора периоду прохождения частиц через щель и связать надлежащим образом напряженность магнитного поля с периодом обращения частицы. Описанные способы ускорения называют резонансными, так как движение частиц находится в резонансе с ускоряющим переменным напряже-

нием. Ускорение по схеме на рис. 10 получило название линейного резонансного ускорения, а по схеме на рис. 11 — циклического резонансного ускорения.

Несложными расчетами можно определить частоты переменного напряжения, необходимые для разных типов ускорителей. Эти частоты лежат в диапазонах, используемых в радиотехнике для радиовещания, связи, телевидения и радиолокации. Радиотехнические устройства ускорителей конструировались на основе опыта, достигнутого при разработке радиовещательных, телевизионных и радиолокационных станций.

4. УСТРОЙСТВО УСКОРИТЕЛЕЙ

Любой ускоритель заряженных частиц состоит из следующих основных частей: вакуумной камеры с насосами для откачки из камеры воздуха, ускоряющей системы, генератора ускоряющего напряжения, источника ускоряемых частиц, называемого инжектором, устройств для ввода и вывода частиц и электромагнита в циклических ускорителях.

Назначение вакуумной камеры состоит в том, чтобы обеспечить свободное движение ускоряемых частиц без столкновений с молекулами газов. Абсолютный вакуум получить невозможно, но технически достижимые разрежения вполне удовлетворяют условию свободного движения ускоряемых частиц.

Ускоряющие системы ускорителей предназначаются для создания ускоряющего напряжения. В разных типах ускорителей ускоряющие системы различны и представляют собой или электроды, или замкнутые резонаторы, или волноводы.

Генератор ускоряющего напряжения развивает в ускоряющей системе напряжение, которое служит для ускорения частиц. Схемы, мощности и рабочие частоты генераторов зависят от типа ускорителя и его ускоряющей системы. В одних ускорителях генератор ускоряющего напряжения — это мощная 200-киловаттная радиостанция, в других — одноламповый маломощный автогенератор мощностью 20—30 *вт*.

Источники ускоряемых частиц — инжекторы — весьма разнообразны по своим устройствам и могут представлять собой как небольшую электронную пушку, мало отличающуюся от применяемых в кинескопах и осциллографических трубках, так и отдельный ускоритель, являющийся инжектором для более крупного ускорителя.

В циклических ускорителях ввод и вывод частиц являются серьезными научными и техническими проблемами, удовлетворительно еще нерешенными. Трудности заключаются в требовании ввода и вывода наибольшего количества частиц и в строго определенное время. В линейных ускорителях ввод и вывод частиц не составляют труда, чем эти ускорители выгодно отличаются от циклических.

Основные технические характеристики и стоимость циклического ускорителя определяются размерами его электромагнита. Сооружение циклических ускорителей на большие энергии частиц требуют электромагнитов очень больших размеров. Чтобы сократить размеры электромагнита, были предложены новые схемы ускорителей, принципы действия которых рассмотрим ниже.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ

В линейных ускорителях частицы движутся прямолинейно. Так как в этом случае не требуется искривлять траекторию частиц, то в таком ускорителе электромагнит отсутствует. Это обязательство упрощает конструкцию устройства и в большой степени удешевляет всю установку.

В настоящее время существуют линейные ускорители для ускорения как протонов, так и электронов.

Другим преимуществом линейного ускорителя перед циклическим является возможность достаточно легко ускорять электроны до миллиардов электроновольт благодаря прямолинейности пути движения частицы. При этом потери энергии электронов на излучение практически отсутствуют. Весьма важным также является простота впуска и выпуска частиц в ускорителе. В циклических ускорителях впуск и выпуск частиц — серьезные трудно разрешимые проблемы. Устройства для впуска и выпуска частиц сильно усложняют ускоритель и требуют особо тщательного механического монтажа и наладки. В линейных ускорителях число ускоряемых частиц может быть сделано гораздо бóльшим, чем в циклических.

Идея линейного ускорения заряженных частиц была предложена еще в 20-х годах, но уровень техники тех лет не позволил решить ряд задач по созданию эффективного линейного ускорителя. В 30-х годах началось развитие циклических ускорителей, и линейный метод ускорения не раз-

вивался почти 20 лет. Только после второй мировой войны в связи с огромными успехами, достигнутыми радиотехникой СВЧ, оказалось возможным построить современные типы линейных ускорителей.

Существуют два типа линейных ускорителей, несколько отличающихся друг от друга по принципу действия. Один из них носит название линейного ускорителя со стоячей волной или пролетными (дрейфовыми) трубками, другой — с бегущей волной.

Линейные ускорители работают при ускоряющих напряжениях очень высоких частот. Для ускорителя с пролетными трубками используются волны длиной 1—3 *м* и даже меньше, а для ускорителя с бегущей волной — волны около 10 *см*.

Из физических соображений ускорители с пролетными трубками применяются для ускорения протонов, а ускорители с бегущей волной — электронов.

5. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ СО СТОЯЧЕЙ ВОЛНОЙ

Принципиальная схема линейного ускорителя с пролетными трубками приведена на рис. 11. В металлический цилиндр *3* с двумя днищами вставлены (по его оси) одна за

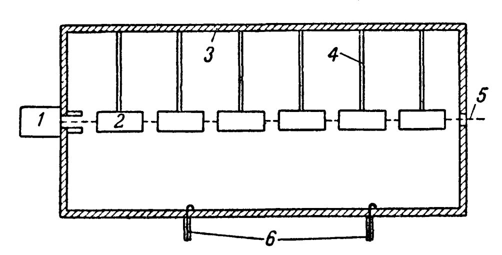


Рис. 11. Схема линейного ускорителя с пролетными трубками.

другой несколько металлических трубок *2*, которые крепятся к цилиндру на штоках *4*. Вдоль оси трубок пролетает пучок ускоряемых частиц *5*, испускаемых инжектором *1*. Цилиндр *3*, являющийся резонатором, возбуждается генератором высокой частоты. Колебания от генератора подводятся при помощи кабелей *6*. Электромагнитное поле внутри цилиндра создает на трубах переменные электрические заряды, и между трубками возникает высокочастотное напряжение. Частица, пролетая зазоры между трубками, ускоряется этим напряжением.

Так как в процессе ускорения скорость частиц увеличивается, то для того, чтобы частица ускорялась все время постоянным по величине напряжением, длина каждой следующей трубки должна быть больше предыдущей. Тогда на прохождение от одного зазора до другого частица будет

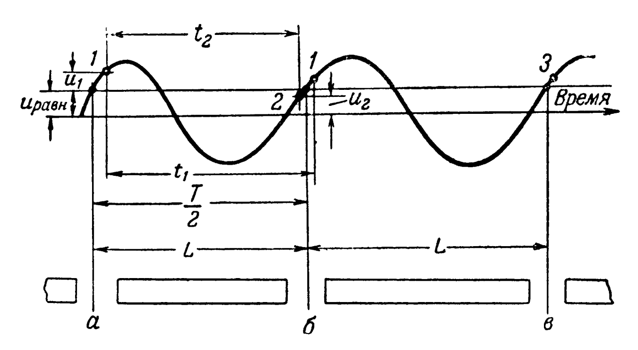


Рис. 12. Автофазировка в линейном ускорителе с пролетными трубками.

затрачивать одно и то же время и, следовательно, попадать в одну и ту же фазу ускоряющего напряжения. Связь между длиной трубок L, скоростью частиц v и временем, равным половине периода колебаний ускоряющего напряжения $T/2$, имеет вид:

$$L = v\frac{T}{2}.$$

Последнее равенство можно, использовав формулу (1), записать и так:

$$L = \frac{\lambda}{2}\sqrt{1-\left(\frac{W_0}{W+W_0}\right)^2},$$

где λ — длина волны ускоряющего напряжения.

Посмотрим, как осуществляется автофазировка ускоряемых частиц. Обратимся к рис. 12. Равновесная частица, которая проходит путь от *а* до *б*, от *б* до *в* и т. д., равный L, за время, равное $T/2$, является резонансной, так как она находится в точном резонансе с электрическим ускоряющим полем. Отклонившаяся от этого положения другая частица, например опередившая (на рис. 12 отмечена цифрой *1*), будет ускоряться большим напряжением u_1 и затратит на про-

хождение пути от *а* до *б* время t_1, меньшее $T/2$. При этом на частицу в промежутке *б* будет действовать ускоряющее напряжение, меньшее, чем u_1. Следовательно, частица на прохождение пути от *б* до *в* затратит время, большее, чем t_1, но все еще меньшее, чем $T/2$. В промежутке *в* частица ускорится напряжением, меньшим, чем в промежутке *б*; путь L она пройдет за время, еще меньшее, и в конце концов ее время прохождения между двумя промежутками почти не будет отличаться от $T/2$, а действующее ускоряющее напряжение станет почти равным $u_{равн}$. В действительности это явление протекает несколько сложнее. Отклонившаяся частица будет совершать колебания около равновесного положения, приближаясь к нему постепенно. Это можно иллюстрировать таким образом. Если в промежутке *а* частица получит такое ускорение, что время t_2 будет значительно меньше $T/2$, то ускоряющее напряжение u_2 в промежутке *б* может быть меньше $u_{равн}$. Такое положение частицы обозначено цифрой *2*. Так как теперь частица ускорится напряжением, меньшим $u_{равн}$, то путь от *б* до *в* она пройдет за время, большее t_2 и, возможно, большее даже $T/2$. Тогда частица в промежутке *в* попадет в положение *3*, ускорится бо́льшим напряжением, чем в промежутке *б*, время ее движения до следующего промежутка уменьшится и т. д. Частица будет все меньше отклоняться от равновесного положения. Аналогичные рассуждения можно провести с частицей, отставшей от резонансной. Она также будет колебаться около равновесной частицы и ее отклонения будут с течением времени уменьшаться.

Мощность высокочастотных колебаний, необходимая для ускорения частиц в линейных ускорителях со стоячей волной, обычно велика и достигает десятков тысяч киловатт и выше в зависимости от конечной энергии ускоряемых частиц. Такую мощность можно получить, разумеется, только при импульсной работе высокочастотного генератора. Часто в ускорителе применяется несколько генераторов, так как один генератор не может обеспечить нужной мощности.

Упрощенная блок-схема высокочастотного устройства линейного ускорителя приведена на рис. 13. Оно состоит из ускорительного резонатора *1* с трубками, нескольких одинаковых генераторов высокочастотных колебаний *4*, задающего генератора высокой частоты *5*, модулятора *3* и источника протонов *2*. Каждый высокочастотный генератор состоит из нескольких каскадов. В каждом каскаде применяются одна-две лампы Оконечные лампы генератора связываются с ре-

зонатором высокочастотным кабелем. Для оконечных ламп всех генераторов резонатор является общей нагрузкой.

Основные трудности в создании высокочастотных генераторов для линейных ускорителей с дрейфовыми трубками заключаются, во-первых в том, что на ультракоротких волнах (порядка 1—3 *м*) уменьшаются отдаваемая мощность и к. п. д. радиоламп в оконечных каскадах усиления высокой частоты. Происходит это из-за увеличивающегося влияния межэлектродных емкостей лампы и главным образом из-за индуктивностей вводов. Можно уменьшить влияния вредных емкостей и индуктивностей уменьшением размеров лампы, но одновременно уменьшится отдаваемая ею мощность из-за сокращения поверхности ее рабочих электродов и ухудшения условий отвода тепла от них. Обычно при конструировании радиоламп выбирается какое-то промежуточное решение.

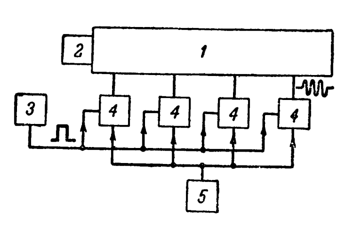


Рис. 13. Блок-схема высокочастотного устройства линейного ускорителя с пролетными трубками.

Во-вторых, на метровых волнах добротность контуров генератора падает. Это приводит к понижению эффективности работы генератора и увеличению количества необходимых ламп для компенсации потери усиления.

Задающий генератор высокой частоты обслуживает все мощные усилители ускорителя. Генератор стабилизирован кварцем. Так как кварц работает на меньших частотах (или на более длинных волнах), в задающем генераторе имеется несколько каскадов умножения частоты.

Модулятор осуществляет подачу импульсного напряжения на аноды ламп мощных усилителей. В оконечных каскадах модулятора применяются электронные лампы или тиратроны. Импульс напряжения с выхода модулятора в 10—15 *кв* и длительностью в несколько микросекунд подается на усилители высокой частоты.

Источник протонов чаще всего представляет собой электростатический ускоритель на 2—4 *Мэв*.

На рис. 14 показан линейный ускоритель с трубками на 9 *Мэв*. Он предназначен для работы в качестве источника протонов в другом ускорителе — синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований (СССР).

Приведем краткие данные об американском ускорителе,

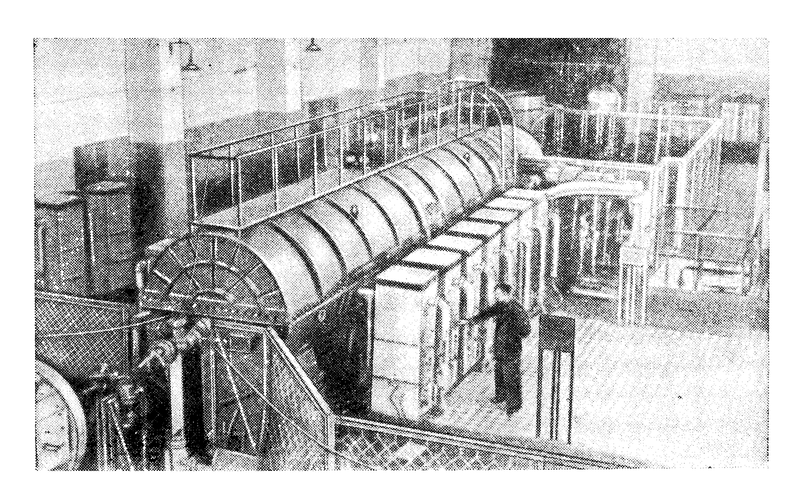


Рис. 14. Общий вид линейного ускорителя с пролетными трубками на энергию протонов 9 *Мэв*.

предназначенном для ускорения протонов до 32 *Мэв*. Его резонатор имеет длину 12 *м* и диаметр 1 *м*. Питается резонатор девятью генераторами с импульсной мощностью 250 *квт* каждый. На аноды ламп оконечных ступеней генераторов подается импульсное напряжение 14 *кв*. Длина волны колебаний ускоряющего напряжения 1,5 *м*. Резонатор ускорителя изготовлен из медных полос длиной 12 *м* каждая. На резонаторе укреплены трубки системы водяного охлаждения. Внутри резонатора на штоках подвешены пролетные трубки, по оси которых пролетает пучок протонов. Резонатор помещается в металлический бак, из которого откачивается воздух. Бак является вакуумной камерой ускорителя и поддерживающей конструкцией для резонатора.

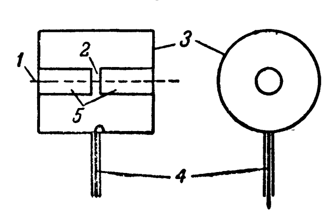


Рис. 15. Одиночный цилиндрический резонатор как ускоритель частиц.

Для ускорения частиц до энергий 1—3 *Мэв* успешно применяются резонаторы более простой конструкции и меньших размеров (рис. 15).

Если взять цилиндрический резонатор *3* и внутрь него вставить полые трубки *5* так, чтобы между трубками образовался зазор *2*, то такой резонатор может служить ускори-

телем заряженных частиц. К резонатору кабелем *4* надо подвести высокочастотное напряжение, а в трубки впустить частицы *1*, которые необходимо ускорить. В сущности этот резонатор мало отличается от описанного выше резонатора — цилиндра с пролетными трубками.

В таких резонаторах частицы можно ускорить до 1 *Мэв*. Мощность, требующаяся от генератора высокой частоты, лежит в пределах десятков и сотен киловатт. Генераторы, а следовательно, и ускорители-резонаторы работают в импульсных отжимах. Обычно применяются 10-сантиметровые и дециметровые волны. Можно соединить последовательно несколько цилиндрических резонаторов с трубками и тем самым повысить конечную энергию частиц.

6. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

Ускоритель с бегущей волной по принципу действия отличается от всех других ускорителей, в которых ускоряющее электрическое поле сосредоточено в определенных участках ускорителя — на его электродах. Частица пробегает эти участки и набирает энергию.

В ускорителе с бегущей волной само ускоряющее электромагнитное поле бежит вместе с частицей и все время как бы «подгоняет», ускоряет ее. В таком ускорителе для соблюдения условий ускорения необходимо, чтобы скорость перемещения фазы волны равнялась скорости ускоряемой частицы. Ускоряющей системой является обычный радиоволновод, который усложняется тем, что в него вставлены металлические плоские диски с отверстиями в центре — диафрагмы. Такой волновод носит название диафрагмированного (рис. 16) *. Генератор высокой частоты создает в волноводе бегущее электрическое поле. Если по оси волновода ввести заряженную частицу, то она начнет двигаться вместе с волной.

Чтобы волновод не был слишком большого диаметра, необходимо применять электромагнитные колебания сантиметрового диапазона. В настоящее время применяются волны длиной около 10 *см*, так как эти волны хорошо освоены. Имеются мощные генераторы и надежная измерительная аппаратура.

На волнах длиной 10 *см* генераторами высокой частоты служат магнетроны, а усилителями — клистроны. Созданы

---

* В диафрагмированном волноводе скорость перемещения фазы электромагнитной волны меньше, чем в обычном, и может быть сделана равной скорости ускоряемой частицы.

магнетроны с импульсной мощностью в несколько тысяч киловатт.

Простейшая блок-схема высокочастотного устройства ускорителя с бегущей волной, в котором применен магнетрон, показана на рис. 17. В этой схеме на магнетрон *1* подается от модулятора *2* импульсное напряжение в несколько десятков тысяч вольт. Магнетрон генерирует колебания и подает их через питающий волновод *3* на диафрагмированный волновод *4*. Волна, пройдя по волноводу и ускорив частицы, попадает в поглотитель мощности *5*. Модулятор одновременно посылает импульс напряжения на источник

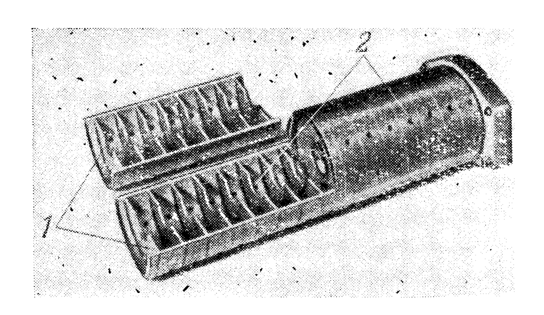


Рис. 16. Основной узел линейного ускорителя с бегущей волной—диафрагмированный волновод.
1 — диафрагмы; *2* — отверстия для откачки волновода.

электронов *6*. Электроны, испускемые источником, захватываются бегущей электромагнитной волной в волноводе, ускоряются и выводятся из ускорителя. Траектория ускоряемых электронов показана на рисунке пунктиром.

Модулятор состоит из нескольких ламп и по схеме и устройству не отличается от модуляторов, применяемых в радиолокационных станциях.

Ускорители с одним магнетроном позволяют получить частицы с энергией в несколько мегаэлектроновольт.

На рис. 18 показано внутреннее устройство одного из таких ускорителей на 4 *Мэв*. Ускорительный волновод *1* длиной 1 *м* вертикальной конструкции помещен в кожух (на рисунке кожух снят). Питание ускорителя осуществляется при помощи прямоугольных волноводов *2*. Все ускорительное устройство крепится на специальной консоли, которая может поворачиваться на оси. Импульсная мощность магнетрона, питающего ускоритель, равна 1 000 *квт*.

Когда мощности магнетрона недостаточно, то равномерно

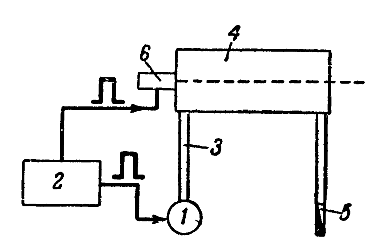


Рис. 17. Блок-схема высокочастотного устройства линейного ускорителя с бегущей волной.

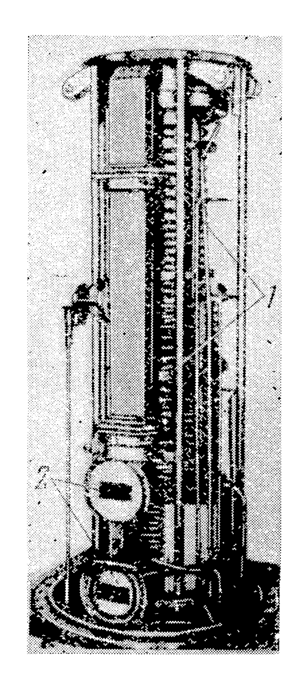


Рис. 18. Устройство английского линейного ускорителя с бегущей волной.

по длине волновода размещается несколько клистронов, которые питаются одним магнетроном. Этот магнетрон играет роль задающего генератора. Блок-схема установки имеет такой же вид, как и для линейного ускорителя с дрейфовыми трубками.

В 1953—1954 гг. в США был введен в действие электронный линейный ускоритель на 1 млрд. *эв*. Его длина равна 67 *м*. Бегущая волна создается 21 клистроном с мощностью в импульсе 17 000 *квт* каждый. Эти мощные клистроны работают при анодном напряжении 400 *кв* и имеют водяное охлаждение. Высота клистрона более 1 *м*.

К недостаткам всех линейных ускорителей надо отнести их большую длину, особенно когда ускоритель предназначается для получения частиц с высокой энергией.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЦИКЛИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ

7. КЛАССИФИКАЦИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Рассматривая формулу (3), можно сделать заключение о трех возможных вариантах работы циклических ускорителей.

Первый вариант. Величина магнитного поля H в процессе ускорения не меняется. С увеличением энергии частицы W частота ее обращения f изменяется. Радиус R кри-

визны траектории, как легко видно из формулы (2), увеличивается, и ускоряемая частица движется по спирали. Ускоритель такого типа называется «фазотроном».

Если энергия частиц увеличивается сравнительно ненамного, то частота обращения частиц остается почти постоянной. Ускоритель с постоянным магнитным полем и постоянной частотой обращения частицы назван «циклотроном».

Второй вариант. Частота обращения частицы f во время ускорения остается постоянной. При увеличении энергии частицы магнитное поле H изменяется. Радиус R кривизны

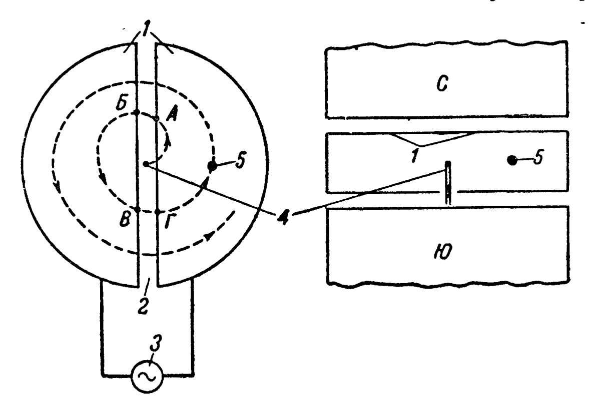


Рис. 19. Схема ускорения частиц в циклическом ускорителе.

траектории частицы также изменяется. Ускоритель с переменным магнитным полем и постоянной частотой обращения частицы носит название «синхротрона».

Третий вариант. Радиус R кривизны траектории частицы не меняется, и частица движется по окружности. Частоту обращения частицы f и магнитное поле H изменяют так, чтобы радиус R оставался постоянным. Этот тип циклического ускорителя у нас назван «синхрофазотроном» (за границей он имеет несколько названий: «бэватрон», «космотрон»).

На рис. 19 дана схема циклического ускорителя, которая отличается от ранее приведенной на рис. 11 тем, что в ней вместо трубки применены два полых полукруглых электрода *1*, называемых дуантами. Между дуантами образована длинная щель *2*, называемая ускоряющей. Частицы движутся внутри дуантов, к которым подключен генератор высокой частоты *3*, создающий на щели ускоряющее напряжение. Дуантная система помещена в магнитное поле, заставляющее частицу *5* двигаться по спирали от центра к периферии.

В центре дуантной системы расположен источник частиц *4*. Процесс ускорения частиц происходит 2 раза за один период высокой частоты. Первый раз ускорение происходит, когда частица (положительно заряженная) проходит щель в точках *А—Б*. Пусть при этом полярность ускоряющего напряжения на щели будет такой: минус на левом дуанте, плюс — на правом. Частица, имеющая положительный заряд, ускорится. Пройдя путь внутри дуанта, до точек *В—Г* на щели, частица снова попадет в ускоряющее поле, так как из условия равенства частоты обращения частицы и частоты генератора время пробега частицы по полуокружности равно половине периода ускоряющего напряжения. Теперь на левом дуанте будет плюс, на правом — минус. Частица снова ускорится.

По этой схеме работают циклотрон и фазотрон, которые используются для ускорения протонов, дейтронов и альфа-частиц.

Иначе работает синхротрон — циклический ускоритель для электронов. При увеличении энергии электрона его скорость быстро приближается к скорости света (рис. 1) и далее почти не изменяется. Согласно формуле (3) в этом случае частота обращения частицы и радиус ее траектории движения практически не будут изменяться. Следовательно, можно построить ускоритель, в котором постоянны частота ускоряющего напряжения и радиус траектории движения электрона.

Постоянство радиуса траектории движения частицы существенно упрощает всю конструкцию ускорителя. Действительно, при постоянном радиусе траектории можно не делать дуантов, а вернуться к первоначальной схеме, приведенной на рис. 10. Так как ускоряемые электроны движутся по окружности, электромагнит синхротрона может иметь кольцевую форму, что позволяет уменьшить вес магнита и стоимость всего ускорителя. Вследствие постоянства частоты радиотехническая часть синхротрона тоже проще, чем радиоустройства других ускорителей.

Хотя применять синхротрон для ускорения протонов, дейтронов и альфа-частиц принципиально и можно, но технически нецелесообразно. В синхротроне, как известно (см. рис. 1), электроны при сравнительно небольшой энергии, а именно при 2 *Мэв*, достигают скорости, почти равной скорости света. Если применить синхротрон для ускорения протонов, то для достижения скорости, примерно равной скорости света, необходимо их ускорить до 4 000 *Мэв*, так как

только при достижении протоном такой энергии и можно осуществить ускорение его по принципу синхротрона, т. е. на постоянном радиусе и при постоянной частоте ускоряющего напряжения. А это — очень сложная техническая задача.

Если в синхротроне изменять во времени и магнитное поле и частоту ускоряющего напряжения, то легко можно ускорить протоны, дейтроны и альфа-частицы при постоянном радиусе кривизны траектории движения частиц. Синхротрон при этом превратится в синхрофазотрон. Радиотехническое устройство синхрофазотрона значительно сложнее, чем фазотрона, циклотрона и синхротрона. Основной трудностью является обеспечение изменения частоты ускоряющего напряжения в большое число раз в соответствии с изменением магнитного поля.

Следует отметить еще одно очень важное обстоятельство. Известно, что в электромагнитах с железом получить магнитное поле выше 18—20 тыс. *э* практически очень трудно. Из формулы (2) видно, что при постоянной величине магнитного поля H с увеличением энергии частицы радиус ее траектории движения должен увеличиваться. Однако увеличивать радиус электромагнита хотя бы до сотни метров нельзя. Ускоритель превратится в громоздкое и сложное сооружение и будет стоить слишком дорого. Это и ограничивает возможность сооружения ускорителей на большие энергии частиц при применении в циклическом ускорителе электромагнита с железом.

Для оценки требований к радиотехническому устройству ускорителей можно привести некоторые данные о необходимых частотах, ускоряющих напряжениях и радиусах траекторий частиц, используя формулу (3). Результаты расчетов сведены в следующую таблицу:

Энергия частиц, *Мэв*	Радиус траектории частицы, *м*		Частота обращения частицы или частота ускоряющего напряжения, *Мгц*		Скорость частиц, тыс. *км/сек*	
	электрона	протона	электрона	протона	электрона	протона
10	0,02	0,254	2 400	26,3	300	43,5
100	0,185	0,825	258	25,2	300	130,5
1 000	1,85	3,14	25,8	13,3	300	262
10 000	18,5	20,3	2,58	2,27	300	290

На основании данных этой таблицы можно сделать следующие выводы:

Для ускорения электронов необходимо применять напряжения частотой в десятки и сотни мегагерц, т. е. колебания с длинами волн до десятков сантиметров.

Для ускорения протонов следует использовать колебания с длинами волн в сотни и десятки метров.

Электроны при малых значениях энергии имеют скорости, близкие к скорости света. Практически при 2 *Мэв* скорость электрона достигает 294 000 *км/сек*.

К таблице надо сделать некоторые замечания. При расчетах H принято равным 18 тыс. *э*. Такая напряженность поля применяется редко. Чаще магнитное поле имеет меньшую величину. Тогда радиусы траекторий увеличиваются, а частоты ускоряющих напряжений уменьшаются.

Таблица показывает также, что при практически достижимых магнитных полях радиус движения протона при энергии, например, 10 000 *Мэв* должен быть не менее 20,3 *м*.

8. ЦИКЛОТРОН

Из циклических ускорителей, предназначенных для ускорения протонов, дейтронов и ядер гелия, наиболее простым является циклотрон. Максимальные энергии протонов, достижимые в циклотроне, не превышают 20—22 *Мэв*. На этом типе циклического ускорителя были проведены многие физические исследования, которые легли в основу современной ядерной физики.

Общий вид электромагнита циклотрона приведен на рис. 20. Ш-образный сердечник имеет в среднем стержне зазор, в котором помещается вакуумная камера (на рисунке камера не показана). На среднем стержне помещены обмотки электромагнита.

Блок-схема высокочастотного устройства ускорителя показана на рис. 21.

Дуанты *6* помещены в вакуумной камере *5* и соединены через отрезки коаксиальных линий *4* с генератором высокочастотных колебаний *3*. Питание ламп генератора обеспечивается блоком *2*, состоящим из выпрямителей для анодных и сеточных напряжений и трансформаторов накала. Управление генератором и контроль за его работой производятся через блок *1*. Генератор состоит из задающего генератора и нескольких каскадов усиления.

Рассмотрим особенности работы высокочастотного генератора циклотрона, примерная схема оконечного каскада которого приведена на рис. 22,*а*.

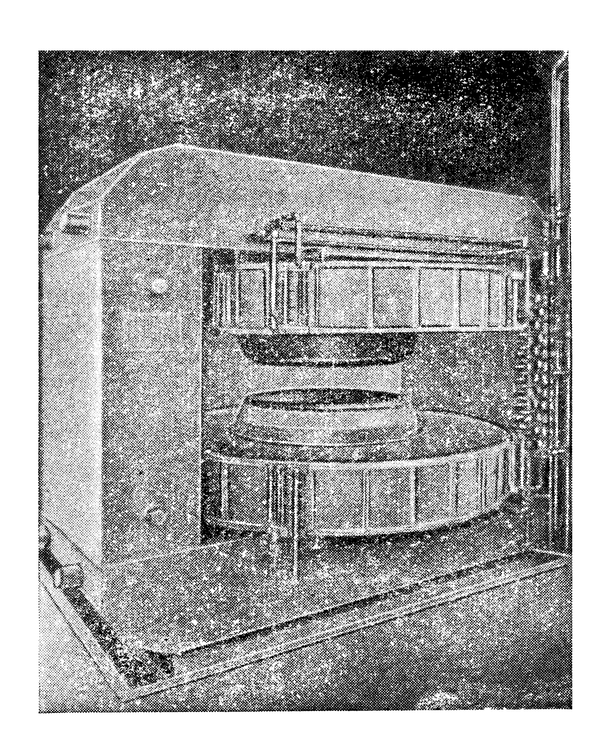


Рис. 20. Общий вид электромагнита циклотрона.

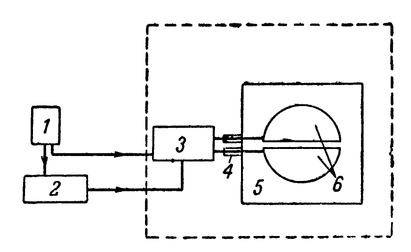


Рис. 21. Блок-схема высокочастотного устройства циклотрона.

Из таблицы видно, что для ускорения протона до 10 *Мэв* генератор должен иметь длину волны около 11 *м*, а для ускорения, дейтронов ~22 *м*. Легко определить, что радиус окружности, по которой движется протон с энергией 10 *Мэв*, будет равен 25,4 *см*.

Дуанты и отрезки линий являются элементами контура оконечной ступени генератора и служат нагрузкой послед-

него. Упрощенная эквивалентная схема этого контура приведена на рис. 22,*б*, где $C_щ$ — емкость между дуантами в ускоряющей щели, на которой развивается ускоряющее напряжение; $C_д$ — емкость дуанта по отношению к корпусу (земле); L — индуктивность контура, которая составляется

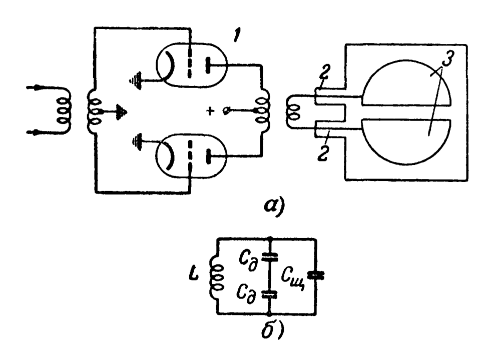


Рис. 22. Упрощенная схема оконечного каскада высокочастотного усилителя циклотрона.
1 — оконечный каскад генератора высокой частоты; 2 — линии; 3 — дуанты.

из индуктивности катушки и эквивалентной индуктивности коаксиальной линии. Общая емкость контура $C = C_щ + \frac{C_д}{2}$. Если на ускоряющей щели надо иметь амплитуду ускоряющего напряжения U, то ток через емкость C (контурный ток) будет

$$I = \frac{UC}{477\lambda},$$

где C — емкость, *см*; λ — длина волны, *м*; U — напряжение, *в*. Этот ток создает потери на активном сопротивлении контура при высокой частоте. Мощность генератора P должна покрыть эти потери. Тогда

$$P = \frac{1}{2} I^2 r.$$

Если амплитуда напряжения на щели будет порядка 50 тыс. *в*, что обычно и имеет место в циклотронах, то при сопротивлении контура 0,05 *ом*, длине волны 11 *м*, емкости щели 30 *см* и емкости каждого дуанта на землю 200 *см* (это будет соответствовать радиусу дуанта 30—40 *см*) получим: $P = 32{,}5$ *квт*. Если же ускоряющее напряжение увеличить

в 2 раза, то мощность генератора будет равна уже 130 *квт*. Из этого примера видно, что высокочастотный генератор для циклотрона является устройством, подобным мощной коротковолновой радиостанции. Он должен содержать и все приспособления, обеспечивающие работу такой станции: мощные тиратронные выпрямители для питания анодных и сеточных цепей ламп, органы настройки и контроля работы отдельных каскадов, систему охлаждения мощных ламп и т. п.

Генератор ускоряющего напряжения состоит из нескольких каскадов усиления высокой частоты с настроенными контурами. Оконечными и предоконечными лампами служат мощные триоды с водяным охлаждением.

Задающий автогенератор циклотрона должен быть очень стабильным по частоте, для чего он стабилизируется кварцем.

Управление генератором высокой частоты осуществляется дистанционно (за 10—15 *м*), так как он располагается рядом с циклотроном, при работе которого возникают вредные для жизни человека излучения. Дуанты и линии снабжены системой охлаждения, так как вся мощность оконечного каскада генератора выделяется на их поверхностях. Система охлаждения выполняется в виде трубок, напаянных на линиях и дуантах и выведенных через вакуумные уплотнения и изоляторы наружу из камеры ускорителя.

Одной из сложных задач является трансформация выходного напряжения генератора для питания щели дуантов. При больших радиусах дуантов и линий их размеры становятся соизмеримыми с длиной волны ускоряющего напряжения. Для таких радиочастотных систем, являющихся системами с распределенными постоянными, произвести предварительный расчет очень трудно. Трансформация высокочастотного выходного напряжения генератора, равного примерно 8—10 *кв*, производится, например, через высокочастотный трансформатор.

Особенностью циклотрона является зависимость конечной энергии ускоряемых частиц от величины амплитуды ускоряющего напряжения. Эта зависимость выражется формулой

$$W_{пред} = 1,13 \sqrt{UW_0}, \quad (5)$$

где U — амплитуда ускоряющего напряжения, млн. *в*; W_0 — постоянная величина, *Мэв* [см. формулу (1)].

Из формулы (5) видно, что чем выше ускоряющее напряжение, тем больше будет энергия частиц, но в этом случае

должен быть больше и диаметр полюсов магнита. Следовательно, размеры дуантов также возрастают, увеличатся емкость дуанта на землю и мощность генератора. Ускоряющее напряжение, однако, не может быть сделано очень высоким по тем же причинам, о которых мы говорили раньше при обсуждении возможности ускорения частиц постоянным или нерезонансным переменным напряжением. Так, максимальное ускоряющее напряжение, достигнутое в самом мощном циклотроне, равно 410 *кв*. При этом энергия протонов достигает 22 *Мэв*. Другой циклотрон работает с напряжением 200 *кв*. Мощность высокочастотного генератора этого циклотрона равна 160 *квт*, а диаметр дуантов — 1,6 *м*.

Ограничение величины максимальной энергии в циклотроне происходит по следующей причине. Частота обращения частицы f, как это видно из формулы (3), зависит от массы частицы m. Согласно формуле (4) масса частицы растет с увеличением скорости, следовательно, частота обращения частицы при ускорении будет уменьшаться. Но в циклотроне период высокочастотного ускоряющего напряжения неизменен, поэтому с увеличением массы частицы наступает нарушение синхронизма между частотой обращения частицы и частотой колебаний высокочастотного ускоряющего напряжения. За один период это нарушение невелико, но суммируется при работе. В результате частица будет постепенно отставать по фазе и в конце концов начнет тормозиться, когда она попадет в тормозящее поле. Как указывалось ранее, при помощи циклотрона можно получить протоны с энергией не выше 20 *Мэв*. Дальнейшее, даже незначительное, повышение энергии частиц в циклотроне сопряжено с большими трудностями и экономически невыгодно.

9. ФАЗОТРОН

Если в циклотроне в процессе ускорения частиц уменьшать частоту колебаний высокочастотного ускоряющего напряжения, то можно поддержать синхронизм между движением ускоряемой частицы и ускоряющим напряжением. Вследствие явления автофазировки ускоряться будет не только та частица, которая за все время ускорения находится в равновесной фазе, но и целая группа частиц, располагающихся вокруг равновесной.

Общая блок-схема радиотехнического устройства фазотрона не отличается от блок-схемы циклотрона. Более того, основные узлы фазотрона почти такие же, как и циклотрона. Обычно диаметр полюсов магнита фазотрона больше, чем у циклотрона, так как достижимые энергии частиц выше,

а частица с более высокой энергией при том же магнитном поле движется по траектории с большим радиусом кривизны.

В фазотронах обычно применяется один дуант, а другой заменяется узким заземленным электродом в виде рамки. Процесс ускорения протекает так же, как и при двух дуантах.

Рассмотрим радиотехническое устройство крупнейшего в мире 6-метрового фазотрона Объединенного института ядерных исследований (СССР). Основные данные этого ускорителя таковы: максимальная энергия протонов — до 680 *Мэв,* диаметр полюсов электромагнита — 6 *м*, напряженность поля электромагнита — 16 800 *э*, вес электромагнита — 7 000 *т*. Частота ускоряющего напряжения меняется от 26,0 до 13,6 *Мгц*, а величина амплитуды ускоряющего напряжения лежит в пределах 15—20 *кв* Внешний вид фазотрона показан на фотографии на рис. 23.

При разработке способа получения ускоряющего напряжения с меняющейся во времени частотой была применена схема мощного однокаскадного автогенератора, нагрузкой которого является высокочастотная система фазотрона. Лампа автогенератора рассчитана только на покрытие потерь высокочастотной мощности в системе.

Высокочастотная система любого фазотрона включает в себя три основных элемента: дуант, устройство, изменяющее частоту ускоряющего напряжения (так называемый «вариатор частоты»), и линию, соединяющую дуант с вариатором и автогенератором.

Упрощенная принципиальная схема высокочастотной системы, примененная в 6-метровом фазотроне, изображена на рис. 24. Вся высокочастотная система образует сложную резонансную нагрузку для автогенератора. Для изменения резонансной частоты системы необходимо применить переменную емкость или индуктивность. Обычно применяется переменный конденсатор, так как его выполнить проще. Особенностями высокочастотной системы 6-метрового фазотрона являются, во-первых, ее большие геометрические размеры, сравнимые с длиной волны возбуждаемых колебаний, во-вторых, наличие многих паразитных резонансных настроек, возникающих вследствие сложности системы, и, в-третьих, изменение в диапазоне рабочих частот полного сопротивления системы.

Большие размеры высокочастотной системы приводят к тому, что в ней устанавливается стоячая волна напряже-

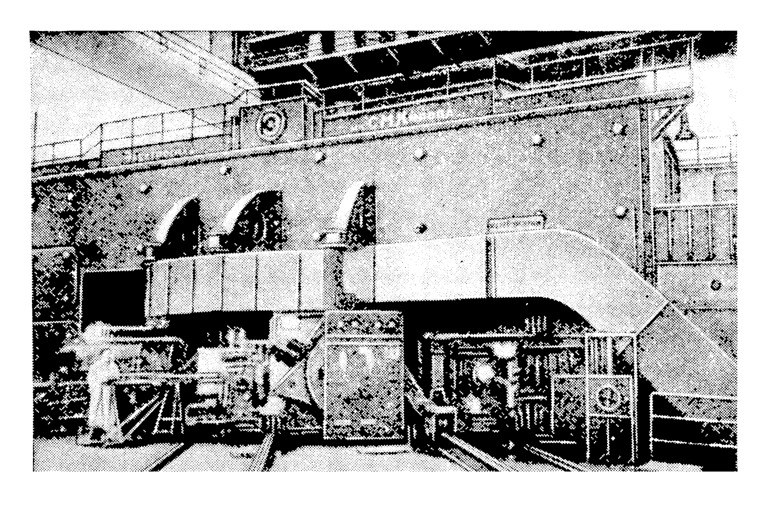


Рис. 23. Общий вид 6-метрового фазотрона Объединенного института ядерных исследований (СССР). На переднем плане— шкаф генератора ускоряющего напряжения.

ния и тока. Система должна рассматриваться как сложная линия с распределенными постоянными.

Паразитными настройками высокочастотной системы являются все резонансы, кроме рабочих. Высокочастотная система представляет собой сложную комбинацию многих резонансных контуров. Из всевозможных настроек этих контуров для работы фазотрона используются только вполне определенные. Остальные же настройки не должны влиять на рабочие резонансы. Это достигается как рациональным выбором конструкции высокочастотной системы, так и созданием специальных схем автогенератора.

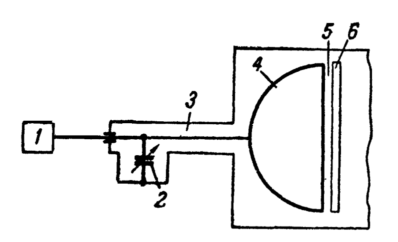


Рис. 24. Блок-схема высокочастотного устройства 6-метрового фазотрона.

1 — автогенератор высокой частоты; *2* — вариатор частоты; *3* — линия; *4* — дуант; *5* — ускоряющая щель; *6* — рамка.

Изменение полного сопротивления системы со стороны автогенератора в диапазоне рабочих частот приводит к тому, что автогенератор не может работать на всех частотах в опимальном режиме. В результате этого меняются высокочастотная мощность, отдаваемая автогенератором в систему,

и ускоряющее напряжение на щели. Требования к автогенератору сводятся к следующему: получение максимальной высокочастотной мощности от автогенератора в диапазоне рабочих частот и, следовательно, максимального напряжения на ускоряющей щели. Это достигается выбором оптимального режима работы автогенератора, что сделать в диапазоне частот не всегда удается. Кроме того, автогенератор должен возбуждаться только в заданной полосе частот.

Упрощенная схема автогенератора 6-метрового фазотрона изображена на рис. 25. На схеме R обозначает высокочастотную систему ускорителя. Автогенератор работает по схеме с заземленной сеткой и обеспечивает возбуждение колебаний только в полосе рабочих частот. На частотах вне этой полосы коэффициент обратной связи автогенератора отрицателен, и возбуждение невозможно. Ограничение возбуждения на частотах ниже самой низкой рабочей частоты осуществляется подбором индуктивности L_2, которая совместно с емкостью C_1 образует параллельный контур в цепи сетка — катод. На частотах ниже резонансной частоты этого контура автогенератор не возбуждается. Изменением величины L_2 можно изменять нижнюю границу частотного диапазона автогенератора. Верхняя граница генерируемых частот определяется последовательным резонансом емкости C_1 и индуктивности L_1. При этом влиянием индуктивности L_2 можно пренебречь. На частотах выше этой резонансной частоты возбуждения автогенератора не происходит. Действительная схема несколько слежнее за счет наличия межэлектродных емкостей и индуктивностей выводов лампы. Достижение оптимального режима работы лампы автогенератора осуществляется подбором коэффициента обратной связи элементами схемы C_1, L_1 и L_2 и величиной конденсатора емкости связи C_2 автогенератора с высокочастотной системой.

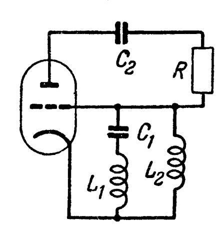


Рис. 25. Схема автогенератора 6-метрового фазотрона.

В автогенераторе 6-метрового фазотрона применены два триода с водяным охлаждением. Автогенератор отдает в высокочастотную систему примерно 30—40 *квт* колебательной мощности. Эта мощность рассеивается на поверхностях дуанта, линии и вариатора и отводится специальной системой водяного охлаждения, представляющей собой ряд медных трубок, напаянных на поверхностях, где выделяется тепло.

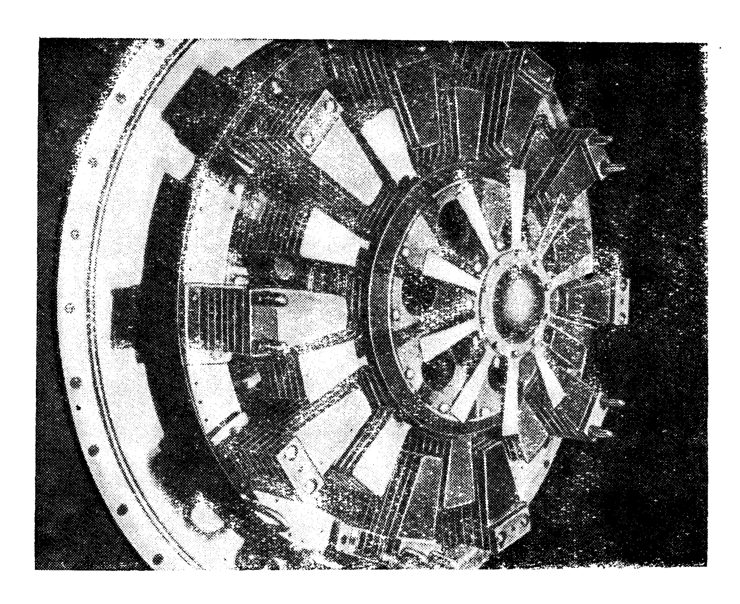


Рис 26. Вариатор частоты.

Важной и ответственной частью радиоустройства фазотрона является вариатор частоты с механическим приводом для вращения его ротора. Вариатор (рис. 26) состоит из статора, образованного рядом неподвижных пластин, расположенных по окружности, и вращающегося короткого вала-ротора с насаженными на него другими пластинами. При вращении ротора его пластины то входят между неподвижными пластинами, то оказываются в промежутках между ними. Так меняется емкость вариатора. Так как вариатор — часть контура автогенератора, по нему протекают высокочастотные токи, нагревая его. Для охлаждения вариатора как к неподвижным, так и к вращающимся пластинам подводится охлаждающая жидкость. Ввиду того, что вариатор находится в поле рассеяния электромагнита ускорителя, его кожух делается из мягкой стали для экранировки ротора от магнитного поля. В противном случае ротор сильно греется от возникающих в нем токов Фуко.

Кроме высокочастотной системы и автогенератора, в радиоустройстве фазотрона имеются еще дополнительные блоки. К ним относятся манипулятор для автогенератора и специальное синхронизирующее устройство, обеспечивающее строгое следование во времени импульсов, управляющих

работой манипулятора, источника протонов и разнообразных физических приборов. Манипулятор управляет работой автогенератора и позволяет запирать его лампы во время нерабочей части цикла. Под нерабочей частью цикла понимается время, когда емкость вариатора меняется от максимальной до минимальной, а резонансная частота всей высокочастотной системы повышается. Как указывалось выше, в фазотроне частота ускоряющего напряжения должна понижаться в процессе ускорения. Выключение автогенератора во время нерабочей части цикла позволяет облегчить условия охлаждения деталей высокочастотной системы и уменьшает потребляемую генератором мощность от выпрямителя.

Высокочастотные схемы фазотронов, построенных за границей, несколько отличаются от описанной выше.

Радиоустройство советского фазотрона разрабатывалось группой научных работников и инженеров под руководством акад. А. Л. Минца и проф. И. Х. Невяжского.

10. СИНХРОТРОН

В синхротроне — циклическом ускорителе для электронов — радиус движения частиц постоянен. Это позволяет применять кольцевой электромагнит и вакуумную камеру в виде полого кольца. В большинстве случаев электромагниты синхротронов питаются переменным током с частотой 50 *гц*, обеспечивая тем самым получение изменяющегося во времени магнитного поля. Можно применять резонансную схему питания обмотки электромагнита, для чего параллельно обмотке включается батарея конденсаторов. Полученный параллельный контур настраивается на 50 *гц*. В такой схеме мощность питания расходуется только на покрытие потерь в контуре. Можно питать электромагнит и импульсным током разряда конденсатора на обмотку.

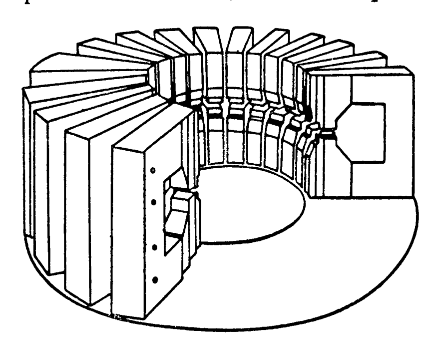


Рис. 27. Схематическое изображение сердечника электромагнита синхротрона.

Форма сердечника электромагнита чаще всего С-образная. Сердечник состоит из многих отдельных блоков.

Примерный вид сердечника приведен на рис. 27.

Для уменьшения потерь на токи Фуко сердечник электромагнита собирается из отдельных стальных пластин. По этой же причине вакуумная камера синхротрона изготавливается не из металла, а из фарфора или кварца.

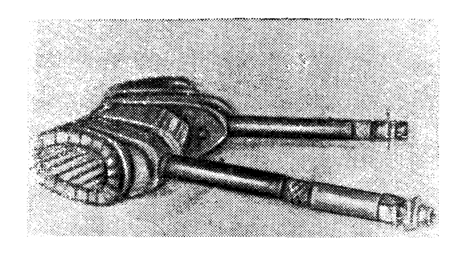
Величина амплитуды ускоряющего напряжения в вольтах должна быть примерно в 2 раза больше прироста энергии электрона за один оборот. В этом случае процесс ускорения электронов будет оптимальным. Прирост энергии за оборот определяется скоростью нарастания магнитного поля и для синусоидального изменения его будет равен:

$$\Delta W = 4 \cdot 10^{-7} R^2 f H_{макс}, \quad (6)$$

где ΔW — прирост энергии, *эв*; R — радиус орбиты, *см*; f — частота тока питания электромагнита, *гц*; $H_{макс}$ — максимальное значение магнитного поля в зазоре магнита, *э*; $H_{макс}$ обычно не превышает $10 \cdot 10^3$ *э*.

В синхротронах на большие энергии (более 300—500 *Мэв*) сказываются потери на излучение электронами электромагнитной энергии. Поэтому необходимая амплитуда ускоряющего напряжения должна быть больше, чем определяемая формулой (6). Так, для синхротрона на энергию 300 *Мэв* при радиусе орбиты 1 *м* необходимо компенсировать потерю энергии примерно 1 тыс. *эв*, при энергии 1 000 *Мэв* и радиусе орбиты 4,5 *м* — 20 тыс. *эв*.

Так как частота ускоряющего напряжения в синхротроне не меняется и лежит в пределах десятков и сотен мегагерц, можно создать ускоряющее устройство в виде замкнутого резонатора, который будет являться оконечным контуром высокочастотного генератора. Если в стенке резонатора сделать щель, то на этой щели возникнет высокочастотное напряжение, которое можно использовать как ускоряющее напряжение синхротрона. Резонаторы обладают малыми потерями, что позволяет при небольшой мощности генератора получить высокое напряжение на щели резонатора. Конструктивно резонатор синхротрона (рис. 28) выполняется следующим образом. Часть кольцевой полой вакуумной камеры синхротрона, обычно изготавливаемой из фарфора или кварца, покрыта по всей поверхности снаружи и внутри слоем серебра. Ускоряющая щель вырезается в слое серебра на внутренней поверхности резонатора. Резонатор соеди-



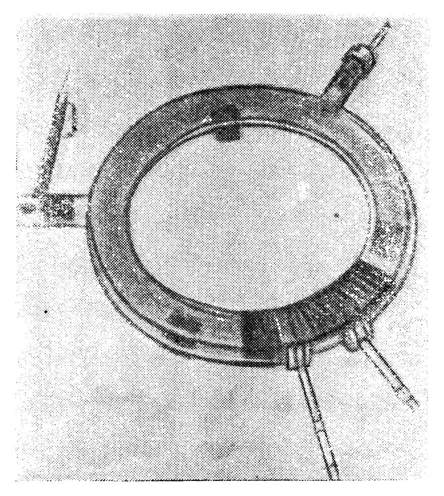


Рис. 28. Резонатор (сверху) и вакуумная камера (снизу) синхротрона.

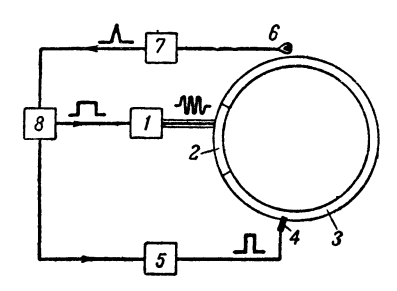


Рис. 29. Блок-схема высокочастотного устройства синхротрона (электромагнит не показан).

няется с высокочастотным генератором при помощи коаксиальной линии. Для уменьшения потерь на токи Фуко в серебряном покрытии резонатора делаются продольные прорези.

Блок-схема радиочастотного устройства синхротрона на 35 *Мэв* приведена на рис. 29. В схеме имеются три основных узла: генератор высокочастотного ускоряющего напряжения *1* с резонатором *2* в вакуумной камере *3*, инжектор электронов *4* с модулятором *5*, датчик магнитного поля *6* с электронной запускающей схемой *7* и формирователем импульсов *8*. Датчик выполняется в виде индукционной катушки, которая размещается в зазоре электромагнита. Датчик и его электронная схема выдают запускающие импульсы на блоки синхротрона при строго определенном значении величины изменяющегося магнитного поля.

Модулятор инжектора электронов в нужный момент времени обеспечивает подачу импульса высокого напряжения длительностью в несколько микросекунд на инжектор.

Инжектором в синхротроне служит устройство, аналогичное электронной пушке в кинескопе, и состоит из катода, фокусирующего электрода и анода. Инжектор работает в им-

пульсном режиме при напряжении в несколько десятков киловольт.

Высокочастотный генератор для синхротрона на 36 *Мэв* представляет собой небольшую установку мощностью 25 *вт*. Этой мощности достаточно для получения на ускоряющей

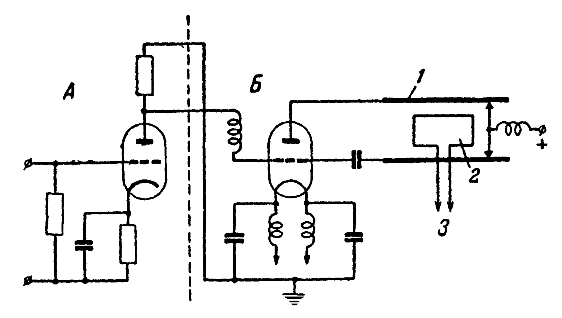


Рис. 30. Схема автогенератора для синхротрона на 35 *Мэв*.

щели резонатора необходимого для работы ускорителя напряжения 150 *в*. Частота ускоряющего напряжения 238 *Мгц*. Схема генератора приведена на рис. 30. Генератор *Б* работает на триоде в режиме самовозбуждения. Выходной контур генератора *1* в виде отрезка двухпроводной линии, включенной между анодом и сеткой триода, связан петлей свя-

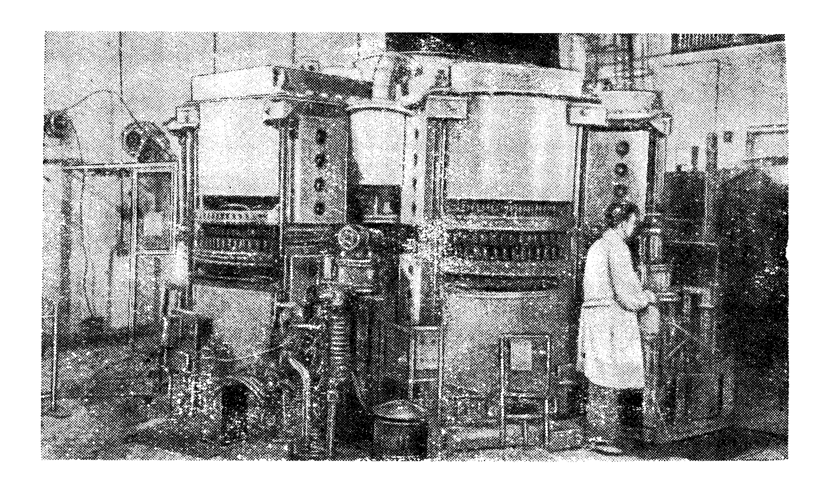


Рис. 31. Синхротрон на 265 *Мэв* Физического института имени Лебедева Академии наук СССР.

зи *2* и 50-омным кабелем *3* с ускоряющим резонатором. Импульсная модуляция генератора на управляющую сетку осуществляется через лампу *А* мультивибратором, который управляется импульсами электронной схемы датчика магнитного поля.

Для синхротрона на 300 *Мэв* требуется уже генератор мощностью 5—10 *квт*. Напряжение на ускоряющей щели в этом синхротроне порядка 2—4 *кв*, а частота ускоряющего напряжения меньше и равна 50 *Мгц*.

На рис. 31 приведена фотография синхротрона Физического института Академии наук СССР на 265 *Мэв*.

11. СИНХРОФАЗОТРОН

Дальнейшее повышение энергии ускоряемых частиц при помощи фазотрона требует создания электромагнитов большего размера, что приводит к чрезмерному усложнению и удорожанию ускорителя. Так, например, для фазотрона на энергию протонов 10 млрд. *эв* диаметр полюсов электромагнита должен быть порядка 40—50 *м*, а вес — несколько сотен тысяч тонн. Стоимость сооружения такого фазотрона будет исключительно велика. Кроме того, значительно усложняются проблемы получения ускоряющего напряжения.

Ускорение частиц в синхрофазотроне при неизменном радиусе траектории движения позволяет применить кольцевой электромагнит значительно меньших веса и стоимости. Синхрофазотроны предназначаются для ускорения протонов до энергии выше 1 млрд. *эв*.

Во всем мире построены лишь три синхрофазотрона с энергиями протонов в несколько миллиардов электроновольт. Из них самый крупный на энергию 10 млрд. *эв* находится в СССР, а два других — в США; один из них дает протоны с энергией до 6,2 млрд. *эв*, другой — до 3 млрд. *эв*.

При разработке радиоустройства синхрофазотрона перед радиотехникой возникли две основные проблемы: во-первых, создание высокочастотного ускоряющего напряжения с изменяющейся в широких пределах частотой и, во-вторых, управление изменением частоты этого напряжения в соответствии с изменением магнитного поля.

Для работы синхрофазотрона необходим диапазон частот ускоряющего напряжения в пределах от сотен килогерц до мегагерц. Частоту высокочастотного генератора в процессе ускорения требуется изменять в 10—12 раз в строгом соответствии с изменением магнитного поля. Последнее тре-

бование наиболее трудно выполнимо, и оно-то и определяет всю сложность радиочастотного устройства ускорителя.

Блок-схема устройства синхрофазотрона приведена на рис. 32.

Работой всех радиочастотных блоков синхрофазотрона управляет изменяющееся магнитное поле. В соответствии с изменением поля должна меняться и частота ускоряющего напряжения. Магнитное поле управляет также работой источника протонов.

Высокочастотный генератор синхрофазотрона состоит из трех основных блоков: задающего генератора с переменной

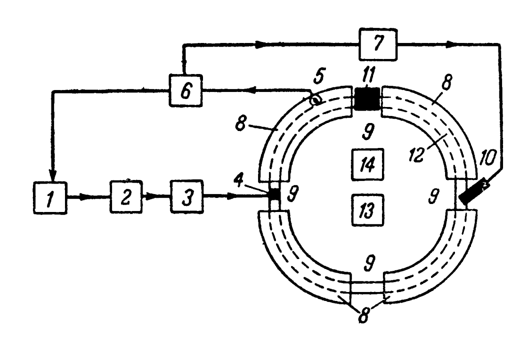


Рис. 32. Блок-схема высокочастотного устройства синхрофазотрона.

частотой, промежуточного усилителя и оконечного мощного усилителя с настраивающимся контуром — ускоряющей системой ускорителя.

Задающий генератор управляется напряжением, зависящим от величины магнитного поля. В соответствии с изменением величины магнитного поля это напряжение меняется и в свою очередь изменяет частоту задающего генератора. С задающего генератора *1* (см. рис. 32) высокочастотное напряжение подается на предварительный усилитель *2*, который управляет мощным оконечным усилителем *3*. Оконечный усилитель *3* питает ускоряющее устройство *4*. Датчик магнитного поля *5* служит для получения данных о величине напряженности магнитного поля ускорителя. Эти данные передаются в электронную схему *6*, которая управляет изменением частоты задающего генератора *1* и процессами инжекции протонов через блок *7*.

Электромагнит синхрофазотрона выполняется из четырех квадрантов *8*, разделенных прямолинейными промежутка-

ми *9*. Эти промежутки необходимы для установки ускоряющей системы *4*, устройства для инжекции частиц *10* и устройства для вывода ускоренных частицы *11*. Ускоряемые частицы движутся внутри кольцевой вакуумной камеры *12*. Электромагнит питается от генераторов тока *13* через преобразователи *14*.

В качестве примера приведем данные радиоустройства синхрофазотрона на 10 млрд. *эв* Объединенного института ядерных исследований (СССР):

Максимальная энергия протонов	10 млрд. *эв*
Радиус траектории движения протонов . .	28 *м*
Наружный радиус магнита	36 „
Длина прямолинейных промежутков между квадрантами магнита	8 „
Магнитное поле в процессе ускорения (меняется)	150—13 000 *э*
Частота ускоряющего напряжения (меняется)	180 *кгц*—1,5 *Мгц*
Вес электромагнита	36 000 *т*
Ширина полюсов кольцевого электромагнита	2 *м*
Высота зазора электромагнита, в котором размещена вакуумная камера	40 *см*
Максимальный ток в обмотках электромагнита	12 800 *а*
Максимальное напряжение на обмотке . .	11 *кв*
Длительность цикла ускорения	3,3 *сек*

На рис. 33 приведена фотография общего вида самого крупного в мире ускорителя — синхрофазотрона на 10 млрд. *эв* Объединенного института ядерных исследований (СССР). В левом нижнем углу рисунка между двумя квадрантами электромагнита в прямолинейном промежутке расположено ускоряющее устройство, а около него внутри кольца электромагнита в двух шкафах находится высокочастотный генератор. На рис. 34 дана общая схема взаимного расположения основных узлов этого синхрофазотрона. На рисунке обозначено: *1*—предварительный линейный ускоритель, являющийся инжектором протонов для синхрофазотрона; *2* — система ввода протонов; *3* — магнитные блоки; *4* — вакуумный насос; *5* — вакуумная камера; *6* — траектория ускоряемых частиц; 7—выводное устройство для ускоренных протонов.

В синхрофазотроне применены две ускоряющие системы в двух противоположных прямолинейных промежутках между квадрантами электромагнита. Это позволило снизить колебательную мощность генератора в 2 раза. В двух других

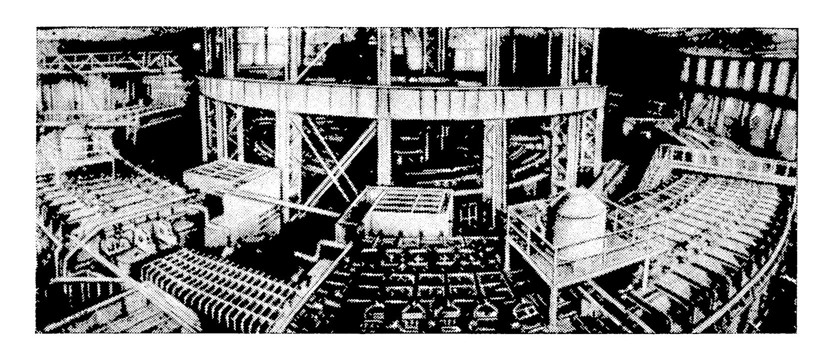


Рис. 33. Общий вид синхрофазотрона на 10 млрд. *эв* Объединенного института ядерных исследований (СССР).

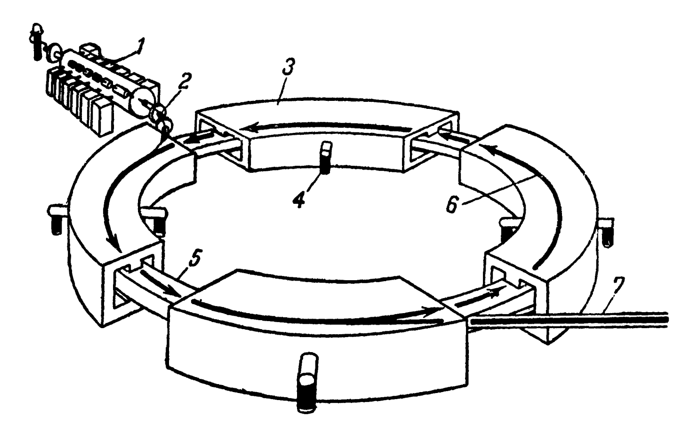


Рис. 34. Схема ускорения в синхрофазотроне на 10 млрд. *эв*.

промежутках помещены устройства для ввода и вывода протонов.

Система питания электромагнита током состоит из четырех синхронных машин с маховиками и ионных преобразователей. При нарастании магнитного поля в электромагните машины работают как генераторы, а ионные преобразователи как выпрямители. Когда напряженность магнитного поля достигает 13 000 *э*, преобразователи переводятся в инверторный режим, а синхронные машины работают как двигатели, вращающие маховики. В маховиках весом каждый 55 *т* запасается энергия, которая используется для вращения синхронных машин, когда они работают в качестве генераторов тока. Такая система питания электро-

магнита позволяет экономить энергию питания. Мощность машин равна 140 000 *ква*.

Несмотря на постоянство радиуса траектории движения ускоряемых частиц, ширину вакуумной камеры нельзя сделать очень малой; она равна ~2 *м*. Это объясняется тем, что при ускорении протоны совершают колебания около среднего радиуса траектории из-за нестабильности параметров ускорителя (частоты ускоряющего напряжения, магнитного поля).

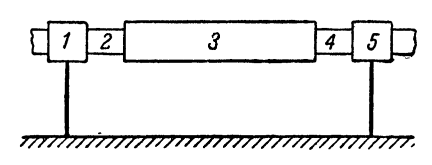


Рис. 35. Схема ускоряющего устройства синхрофазотрона.

Ускоряющее устройство выполнено в виде пролетной трубки *3* (рис. 35) и двух зазоров *2* и *4* между пролетной трубкой и металлическими заземленными рамками *1* и *5*. Высокочастотное напряжение прикладывается между трубкой и рамками. Частица, пролетая зазоры, один раз встречает замедляющее электрическое поле, а в другой раз — ускоряющее. Если за время пролета частицы по длине трубки *3* фаза высокочастотного напряжения изменится так, что ускоряющая разность потенциалов будет больше замедляющей, то частица получит приращение энергии. За один оборот это приращение невелико и составляет в двух ускоряющих устройствах 2 200 *эв*. Протоны, совершая 4,5 млн. оборотов, достигают энергии 10 млрд. *эв*.

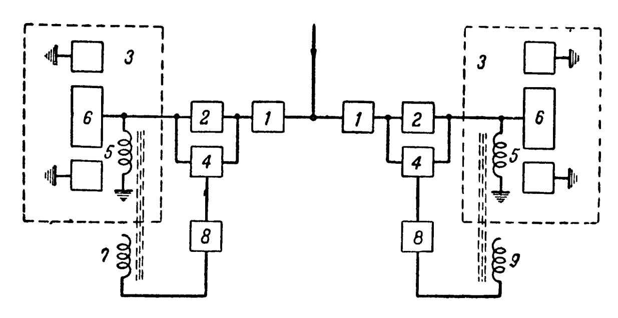


Рис. 36. Блок-схема высокочастотных усилителей и ускоряющих систем.

Блок-схема мощных высокочастотных усилителей и ускоряющих систем синхрофазотрона показана на рис. 36. Усилители мощностью по 200 *квт* каждый должны обеспечить

напряжение на пролетных трубках до 20 *кв*. Предварительные усилители *1* представляют собой широкополосные корректированные устройства с несколькими каскадами усиления. Широкополосное усиление применяется только в предварительных каскадах, а оконечные усилители *2*, определяющие основное потребление энергии от сети питания, работают на настраивающуюся нагрузку *3*. Нагрузка оконечного усилителя в виде обычного колебательного контура образована из емкости пролетной трубки *6* на землю и специальной индуктивности *5* с ферритовым сердечником. Настройка оконечного контура производится изменением магнитной проницаемости феррита подмагничиванием его. Величина тока в обмотке подмагничивания *7* зависит от расстройки контура *3* и управляется фазовым детектором *4* через усилитель постоянного тока *8*. Индуктивность *5* состоит из двух короткозамкнутых отрезков коаксиальной линии, включенных параллельно. Внутренний проводник линии представляет собой трубку, на которую насажены кольца из феррита, а внутри трубки помещена обмотка подмагничивания феррита. Ток, протекающий по обмотке, образует магнитное поле, которое изменяет магнитную проницаемость феррита. Это в свою очередь приводит к изменению индуктивности отрезка коаксиальной линии. Так производится настройка контура оконечного каскада усилителя.

Одной из труднейших задач являлось создание устройства, обеспечивающего связь магнитного поля с частотой ускоряющего напряжения, так называемой системы связи f и H. Необходимый закон изменения частоты f в зависимости от магнитного поля H выражается следующей формулой:

$$f=\frac{c}{2\pi R+4L}\cdot\frac{H}{\sqrt{H^2+\frac{10,45\cdot 10^3}{R^2}}}, \qquad (7)$$

где c — скорость света, R — радиус кривизны траектории движения частицы; L — длина прямолинейного промежутка.

Как видно из этой формулы, зависимость f от H нелинейна и достаточно сложна.

В синхрофазотроне на 10 млрд. *эв* магнитное поле в процессе ускорения изменяется от 150 до 13 000 *э*, а частота должна меняться при этом от 0,180 до 1,5 *Мгц*. Главную сложность устройства связи между f и H составляет требование к точности соответствия частоты магнитному полю. Допустимая неточность соответствия частоты магнитному

полю определяется допуском на колебание радиуса орбиты R Как видно из формулы (7), для данного H существует вполне определенное значение f при заданной величине радиуса R кривизны траектории. Ясно, что равенство (7) будет соблюдаться при том же H и другом значении f только тогда, когда R изменится. Можно, следовательно, определить допуск на отклонение частоты от закона, определяемого формулой (7), при небольшом, допустимом изменении радиуса R.

Для синхрофазотрона 10 млрд. *эв* этот допуск на изменение частоты составляет $\pm 0{,}16\%$ на низшей и $\pm 0{,}3\%$ на высшей частоте рабочего диапазона. При этом радиус R изменяется на ± 10 *см*.

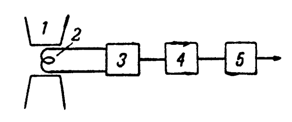


Рис. 37. Блок-схема системы связи f и H.

В процессе разработки радиоустройства синхрофазотрона были созданы два варианта системы связи f и H.

Блок-схема одного из вариантов приведена на рис. 37. Здесь обозначено: *1* — электромагнит ускорителя; *2* — индукционная катушка, помещаемая в зазоре электромагнита; *3*—интегратор; *4*—функциональный преобразователь; *5* — задающий генератор. Допуски на нестабильности элементов системы связи на низшей частоте были установлены следующие: для интегратора $\pm 0{,}03\%$, для функционального преобразователя $\pm 0{,}03\%$ и для задающего генератора $\pm 0{,}05\%$.

Во время изменения магнитного поля на зажимах катушки *2* возникает напряжение, зависящее от скорости изменения поля. В интеграторе это напряжение преобразуется в напряжение, зависящее от величины магнитного поля. Функциональный преобразователь *4*, управляемый напряжением интегратора, вырабатывает управляющее напряжение для частотной модуляции задающего генератора *5*. Если частота задающего генератора меняется пропорционально модулирующему напряжению, то функциональный преобразователь должен обеспечить получение напряжения, зависящего от величины магнитного поля так же, как и частота f в формуле (7). В общем же случае, зная модуляционную характеристику задающего генератора, можно всегда определить, какой закон изменения напряжения должен быть получен в функциональном преобразователе, чтобы частота задающего генератора изменялась соответственно формуле (7).

Электронная схема функционального преобразователя преобразует линейно меняющееся со временем напряжение интегратора в напряжение, нелинейное во времени. Это осуществляется при помощи ряда нелинейных схем, выполненных на диодах. Получение необходимого закона изменения выходного напряжения функционального преобразователя осуществляется выбором величины напряжения отпирания каждого диода и регулировкой сопротивлений, включенных последовательно с диодами.

Точность работы функционального преобразователя в 10 раз выше точности работы примерно таких же устройств в счетно-решающих машинах.

Задающий генератор *5* состоит из следующих основных частей: автогенератора, управляющего усилителя постоянного тока и цепи обратной связи. Катушка индуктивности колебательного контура автогенератора имеет ферритовый сердечник с обмоткой подмагничивания. Управляющий усилитель постоянного тока, на который подается напряжение от функционального преобразователя, питает обмотку подмагничивания, в которой меняется ток. При этом частота контура автогенератора изменяется от 0,15 до 1,5 *Мгц*. Цепь обратной связи служит для стабилизации модуляционной характеристики задающего генератора. Наличие этой обратной связи является отличительной особенностью схемы и позволяет осуществить требующуюся стабильность изменения частоты генератора. Стабильность задающего генератора определяется только стабильностью цепи обратной связи, а в этой цепи — только стабильностью основного ее звена — широкополосного частотного детектора. Примененная схема задающего генератора со стабилизирующей модуляционную характеристику обратной связью оказывается более простой в наладке и работе, чем схема автогенератора с высокостабильной модуляционной характеристикой.

Мы кратко описали особенности и принципы действия радиоустройства крупнейшего в мире синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований. Радиоустройства американских синхрофазотронов отличаются от описанных выше, но основные принципы их работы те же.

Американский синхрофазотрон на энергию протонов 3 млрд. *эв* показан на рис. 38. Этот ускоритель назван «космотроном».

Недостатком синхрофазотронов надо считать большие размеры вакуумной камеры. Вследствие этого вес магнита велик, что и определяет стоимость сооружения. Размеры

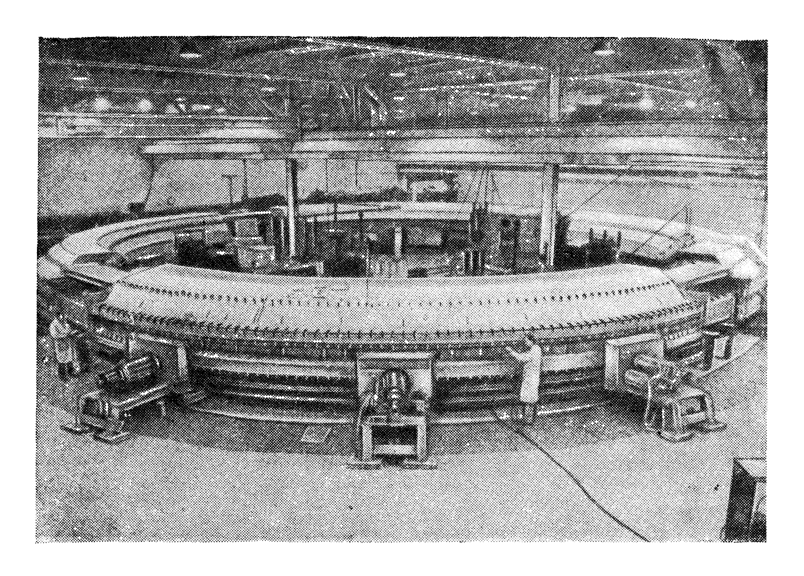


Рис. 38. Американский синхрофазотрон на 3 млрд. *эв.*

сечения вакуумной камеры определяются колебаниями радиуса траектории ускоряемых частиц. Следовательно, если сделать ускоритель, в котором колебания радиуса траектории будут меньшими, то можно снизить вес железа магнита и уменьшить стоимость всего ускорителя.

Проекты таких ускорителей уже имеются. Они получили название синхрофазотронов с «сильной» или «жесткой» фокусировкой.

12. КОЛЬЦЕВЫЕ УСКОРИТЕЛИ С СИЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Теоретический анализ кольцевых ускорителей показал, что уменьшить амплитуду радиальных колебаний ускоряемых частиц можно, если применить особый способ поддержания устойчивости частиц во время ускорения. Этот способ получил название сильной фокусировки частиц.

В ускорителях с сильной фокусировкой применяются магнитные поля специального вида, которые препятствуют отклонению ускоряемых частиц попеременно то в вертикальном, то в горизонтальном направлении. Пучок частиц как бы поджимается по вертикали или горизонтали. В результате движение частиц получается устойчивым и, что самое важное, амплитуда колебаний радиуса траектории уменьшается в 10—20 раз. Тогда вакуумную камеру ускорителя можно

сделать гораздо меньшего сечения, что поведет за собой уменьшение размеров полюсов магнита и самого магнита. Понизится вес железа и, кроме того, потребуется меньшая реактивная мощность для создания магнитного поля. Экономическая выгода несомненна.

В качестве примера приведем данные о проектируемом в Советском Союзе синхрофазотроне с сильной фокусировкой на энергию протонов 50—60 млрд. *эв*:

Радиус траектории	236 *м*
Вес магнитной системы	не более 22 000 *т*
Максимальное магнитное поле . . .	10 000—12 000 *э*
Размеры сечения вакуумной камеры	20×12 *см*
Мощность высокочастотных генераторов	500 *квт*
Частота ускоряющего напряжения	2,624—6,068 *Мгц*
Число циклов в минуту	6
Инжектор	линейный ускоритель на 100 *Мэв*

Из приведенных данных видно, что синхрофазотрон с сильной фокусировкой на 50—60 млрд. *эв* имеет вес магнита меньший, чем обычный синхрофазотрон на 10 млрд. *эв*. Уменьшение сечения вакуумной камеры с 200×36 до 20×12 *см* привело к уменьшению размеров полюсов магнита и веса железа.

Магнитную систему синхрофазотрона предполагается составить из 120 отдельных блоков, расположенных по окружности. Из них часть магнитов должна фокусировать пучок по вертикали, другие — по горизонтали.

Для обеспечения нормальной работы ускорителя с сильной фокусировкой необходимо устанавливать магнитные блоки один относительно другого с большой точностью. Точность установки не должна быть хуже 1 *мм*. В этом и заключается большая трудность сооружения кольцевых ускорителей с сильной фокусировкой.

Как указывалось выше, в циклотроне практически нельзя ускорять частицы до энергий выше 20—22 *Мэв*. Применив в циклотроне принцип сильной фокусировки, можно ускорять частицы до сотен миллионов электроновольт.

Так же обстоит дело и в фазотроне, синхротроне и синхрофазотроне. Во всех этих ускорителях магнитное поле в зазоре для поддержания устойчивости частиц обязательно должно слегка уменьшаться по направлению от центра ускорителя к его периферии. Применяя сильную фокусировку, можно поле в зазоре любого из этих ускорителей сделать увеличивающимся по направлению от центра ускорителя.

Тогда в синхрофазотроне вместо того, чтобы изменять магнитное поле во времени, можно изменять его по радиусу, оставив постоянным во времени (рис. 39). Синхрофазотрон превратился в кольцевой ускоритель с постоянным во времени магнитным полем и переменной частотой ускоряющего напряжения.

Подобный синхрофазотрон назван кольцевым фазотроном и предложен советскими физиками А. А. Коломенским, В. А. Петуховым и М. С. Рабиновичем. Его преимущества перед синхрофазотроном обычного типа велики. Во-первых, повышается число ускоряемых частиц, так как количество циклов ускорения можно сделать бо́льшим, чем у обычного синхрофазотрона. Это объясняется тем, что в обычном синхрофазотроне число циклов ускорения определяется временем, необходимым для увеличения и уменьшения магнитного поля. Это время обычно велико и равно нескольким секундам. В кольцевом фазотроне цикл ускорения задается только временем, требующимся на изменение частоты ускоряющего напряжения. Это время может быть равно десятым и сотым долям секунды. Вследствие этого число циклов повторения в кольцевом фазотроне значительно выше, чем в обычном синхрофазотроне. Число ускоренных частиц также будет бо́льшим. Во-вторых, схема электропитания магнита сильно упрощается, что дает большой экономический выигрыш. В-третьих, не требуется сложной системы связи магнитного поля с частотой ускоряющего напряжения. Радиоустройство ускорителя значительно проще, чем синхрофазотрона. В-четвертых, в кольцевом фазотроне упрощается ввод частиц в ускоритель, и можно вводить частицы с более низкой энергией. Поэтому предварительный линейный ускоритель не нужен.

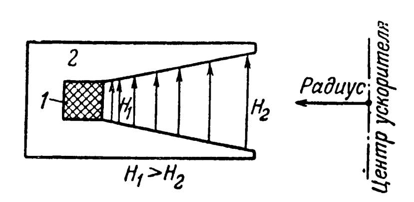


Рис. 39. Схема сечения кольца циклического ускорителя с жесткой фокусировкой и постоянным во времени магнитным полем. Магнитное поле увеличивается с ростом радиуса.

1 — обмотка; 2 — железо электромагнита.

Недостатком кольцевого фазотрона является усложнение полюсов магнита с целью придания им формы, необходимой для осуществления сильной фокусировки.

Подобным же образом может быть изменен и циклический

электронный ускоритель — синхротрон. Его устройство тоже упростится.

Кольцевые фазотроны еще не построены. Ведется только разработка их проектов.

13. ЦИКЛИЧЕСКИЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫЕ УСКОРИТЕЛИ

В циклических ускорителях намечаются тенденции к отказу от железа в электромагните, что дало бы возможность резко повысить величину магнитного поля. Для решения этой задачи необходимо, во-первых, создать источник большой силы тока, питающего электромагнит, и, во-вторых, разработать конструкцию обмотки электромагнита достаточной механической прочности, так как силы, действующие на обмотку вследствие протекания больших токов, велики.

Интересен проект безжелезного синхрофазотрона на 10 млрд. *эв*. Этот ускоритель предполагается построить в Австралии. Стоимость его должна быть гораздо ниже стоимости ускорителей с железом в электромагните на ту же энергию частиц. Блок-схема такого ускорителя приведена на рис. 40 и состоит из генератора тока *4*, создающего магнитное поле, кольцевых токопроводов *2*, вакуумной камеры *3* и высокочастотного устройства *1* с ускоряющей системой *5*. Магнитное поле ускорителя образуется между двумя кольцевыми токопроводами, между которыми помещена вакуумная камера. Расчетное значение напряженности магнитного поля должно достичь 80—100 тыс. *э*, а радиус окружности, на которой ускоряются протоны, не превысит 420 *см*. Для создания такого магнитного поля токопроводы надо питать током в миллионы ампер.

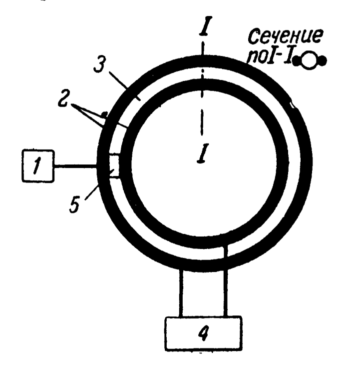


Рис. 40. Блок-схема безжелезного синхрофазотрона.

Генератор тока представляет собой мощную униполярную машину. Принцип действия такой машины заключается в том, что на вращающемся в магнитном поле диске возникает разность потенциалов между центром диска и его периферией. Если к этим точкам подключить токопроводы с малым сопротивлением, то можно получить весьма большой ток. Униполярная машина для питания токопроводов синхрофазотрона будет иметь четыре диска общим весом 80 *т*,

вращающихся со скоростью 900 *об/мин* в поле специального магнита. Для улучшения контакта с вращающимся диском съем тока с дисков осуществляется при помощи струй расплавленного натрия. Машина обеспечивает ток 1,7 млн. *а* за время 0,65 *сек.*

Ускоряющая система синхрофазотрона, как предполагается, будет выполнена в виде высокочастотного трансформатора с ферритовым сердечником. Частота ускоряющего напряжения должна меняться в 8 раз. Предполагается, что в безжелезном синхрофазотроне впоследствии можно будет применить принцип сильной фокусировки, хотя еще неясно, как создать необходимую конфигурацию магнитного поля.

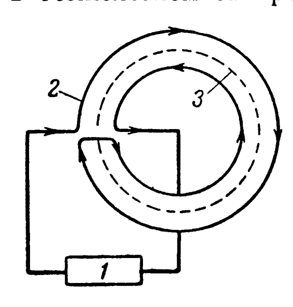


Рис. 41. Схема безжелезного синхротрона системы Будкера.

Советским физиком Г. И. Будкером предложена новая конструкция безжелезного синхротрона, схема которого приведена на рис. 41. Ток от источника *1*, создающий магнитное поле, протекает по стенкам вакуумной камеры *2*, в которой ускоряются электроны *3*. «Обмотка» образует два витка, в которых токи протекают в противоположных направлениях Таким образом, схема образования магнитного поля аналогична описанной выше схеме, примененной в безжелезном синхрофазотроне. Для получения магнитного поля большой напряженности, до 100 тыс. *э*, синхротрон должен питаться импульсным током 1 млн. *а*. Импульс тока образуется разрядом батареи конденсаторов на обмотку ускорителя. Синхротроны подобного типа будут иметь небольшие размеры, а энергия ускоренных электронов достигнет, вероятно, миллиардов электроновольт. Так, один из проектируемых синхротронов на энергию 1 млрд. *эв* имеет радиус орбиты 33 *см*, а другой — на энергию 3 млрд. *эв* — 1 *м*.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ

14. УСКОРИТЕЛИ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

В сложном атомном ядре имеется несколько десятков протонов — положительно заряженных частиц. Протоны в сложном ядре, несмотря на взаимное отталкивание, не

разлетаются в разные стороны, а совместно с нейтронами образуют очень прочное соединение частиц. Следовательно, в ядрах существуют какие-то особые силы, способные противостоять силам взаимного отталкивания одноименных зарядов.

Изучив эти силы, их законы, можно попытаться использовать их, применив как источник энергии. Первые такие попытки уже сделаны, в результате чего появились атомные и водородные бомбы, а также атомные электростанции.

Для самого общего изучения строения ядра пользуются воздействием на него ускоренными частицами с относительно невысокими энергиями до 10 *Мэв*. При этих энергиях бомбардирующие протоны уже преодолевают отталкивающие электрические силы бомбардируемого ядра и могут вступать во взаимодействие с ядром. Если энергия летящего протона будет еще выше, то взаимодействие ускоренной частицы с изучаемым ядром усложнится. Это взаимодействие может выразится или в искривлении траектории ускоренной частицы, если она пролетает на некотором расстоянии от ядра, или в столкновении бомбардирующей частицы с ядром. В последнем случае и происходят ядерные реакции, в результате чего может иметь место частичное или полное расщепление ядра. При этом из ядра выделяются одна или больше ядерных частиц или же ядро распадается на части. Изучая искривление траекторий бомбардирующей частицы и результаты расщепления ядра, можно получить сведения о самом ядре. При увеличении энергии бомбардирующего протона до нескольких сотен миллионов электроновольт процессы расщепления ядер еще более усложняются. В результате ядерных реакций появляются новые частицы — мезоны. Они играют весьма большую роль в ядерных превращениях и изучение их дает много ценных сведений о ядерных силах. Ускорители на энергии протонов в сотни миллионов электроновольт служат для получения больших количеств мезонов.

Частицы, ускоренные до миллиардов электроновольт, начинают взаимодействовать уже не только с ядрами в целом, но и с отдельными частицами, входящими в состав ядра. При взаимодействии атомных частиц могут образоваться новые частицы, неизвестные ранее. Для этого энергия бомбардирующей частицы должна быть не меньше нескольких миллиардов электроновольт. Так, например, при помощи американского синхрофазотрона на 6 млрд. *эв* были получены новые частицы: антипротон — частица с массой, равной массе протона, но имеющая отрицательный заряд, и антинейтрон.

15. УСКОРИТЕЛИ КАК ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВЫХ ЛУЧЕЙ

Трубки для получения рентгеновых лучей существуют давно. По сути дела они являются первыми линейными электронными ускорителями с применением постоянного напряжения. Максимальные, технически возможные напряжения в рентгеновских аппаратах не превышают 2 млн. *в*. Известно, что жесткие рентгеновы лучи меньше поглощаются веществом, чем мягкие, и при их помощи легче просвечивать большие толщи материала. Чем выше напряжение в рентгеновской трубке, тем более жесткие рентгеновы лучи можно получить.

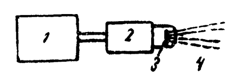


Рис. 42. Схема рентгеновского аппарата с линейным электронным ускорителем.

1 — блок питания; 2 — линейный ускоритель; 3 — мишень; 4—рентгеновское излучение.

Применение рентгеновых лучей в различных областях науки и техники принимает все более широкий размах. Увеличение жесткости рентгеновых лучей становится совершенно необходимым.

Но обычные рентгеновские аппараты с напряжением выше 2 млн. *в* слишком громоздки, ненадежны в работе и стоимость их высока.

Линейный электронный ускоритель с бегущей волной легко может дать лучи, соответствующие лучам рентгеновских трубок с напряжением, бо́льшим чем 2 млн. *в*.

Схема рентгеновского аппарата с линейным электронным ускорителем приведена на рис. 42. Здесь вместо рентгеновской трубки установлен ускоритель. Ускоренные электроны попадают на металлическую мишень, тормозятся, вследствие чего создается рентгеновское излучение. Ускоритель с энергией электронов, например, 4 *Мэв* будет эквивалентен рентгеновской трубке с напряжением 4 млн *в*. Таким путем можно получить рентгеновы лучи очень высокой проникающей способности. При этом прибор получается компактным, что во всех случаях весьма желательно. Сам линейный ускоритель в таком аппарате может иметь вид небольшого цилиндра длиной 1 *м* и диаметром 0,5 *м* и может быть размещен на вращающейся консоли или качающейся раме, что облегчает его использование.

Линейный ускоритель как источник рентгеновского излучения применяется в медицине как прибор для производства рентгеновских снимков, а также для лечения при некоторых заболеваниях внутренних органов и кожи (рис. 43).

Можно использовать линейный ускоритель как источник

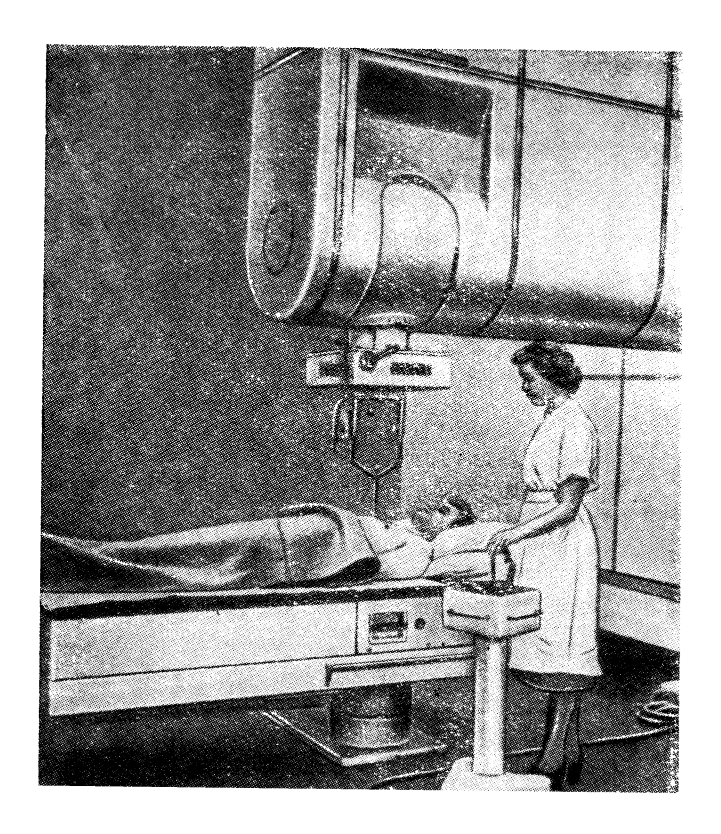


Рис. 43. Английский линейный электронный ускоритель на энергию 8 *Мэв* для рентгенотерапии.

рентгеновского излучения для дефектоскопии машиностроительных деталей, причем жесткость лучей может быть сделана выше, чем в имеющихся для этой цели рентгеновских аппаратах. Это особенно важно для рентгеноскопии ответственных деталей крупных размеров, которые мягкими лучами просвечивать практически невозможно.

Дальнейшее усовершенствование техники линейных ускорителей позволит создать очень небольшие рентгеновские установки для получения сверхжестких лучей.

16. УСКОРИТЕЛИ ДЛЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ

Стерилизация консервированных продуктов — трудоемкая операция, отнимающая много времени. Для ряда продуктов разрабатывается специальная сложная технология

обработки, обеспечивающая возможность длительного хранения их.

Применение линейного ускорителя для целей стерилизации настолько упрощает весь процесс, что его можно проводить совместно с другими операциями, и значительно сокращает время изготовления консервов, удешевляя и улучшая их качество. Действие линейного ускорителя как стерилизатора основано на способности потока электронов убивать микроорганизмы. Так как пищевые продукты являются веществами, гораздо менее плотными, чем бетон или железо, для хорошего облучения их достаточно энергии электронов в 1 *Мэв*.

Схема установки для облучения консервов проста. Заполненные консервные банки запаиваются и устанавливаются на конвейерную ленту, по которой они доставляются к упаковочным ящикам. Во время движения по ленте банки проходят мимо линейного ускорителя, пересекая излучаемый им поток электронов. В это время и происходит стерилизация консервируемого продукта. Тонкая жесть банки практически не препятствует прохождению ускоренных электронов. Так как при такой стерилизации не происходит ни нагревания, ни замораживания продуктов, то их естественные качества не изменяются.

Подобным путем можно производить также стерилизацию медицинских инструментов, перевязочных материалов и т. д. При этом уменьшается время на обработку этих материалов и повышается надежность стерилизации.

В будущем, по-видимому, линейные электронные ускорители будут применяться для очистки от микробов воды и воздуха.

17. УСКОРИТЕЛИ В РАДИОТЕХНИКЕ

В последние 10 лет в радиотехнике все чаще применяются высокочастотные колебания с длинами волн короче 10 *см*. Сантиметровые и миллиметровые волны находят применение в радиолокации, радиоастрономии, физике.

Радиоинженеры стремятся создать электронные приборы, которые могли бы уверенно генерировать миллиметровые волны. Однако методы получения сантиметровых волн практически мало пригодны для волн короче 4—5 *мм*. Приходится искать совершенно новые пути.

Одним из новейших методов, еще не совсем изученным, является использование упоминавшегося выше вредного для циклического ускорителя излучения электроном электромагнитных колебаний при искривлении его траектории. Но для

технического использования этого явления циклический ускоритель менее удобен, чем электронный линейный. Схема такого устройства может быть следующей (рис. 44). Линейный ускоритель *1* с энергией электронов 1—3 *Мэв* испускает поток частиц, которые в специальном устройстве подвергаются воздействию магнитных полей. Траектория электронов *2* слегка искривляется и становится похожей на волнистую кривую линию. Электроны, двигаясь в таких условиях, излучают электромагнитные колебания *3* весьма коротких длин волн. Общая схема, как видно из этого рисунка, проста. Но все же практически нужны некоторые специальные до-

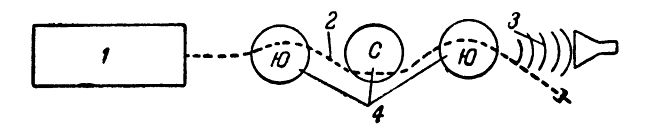


Рис. 44. Схема генератора миллиметровых радиоволн с использованием линейного электронного ускорителя.

полнительные приспособления, усложняющие всю установку. Пока что еще нет достаточных данных, чтобы судить о возможности практического использования такого метода получения миллиметровых радиоволн. Но и те немногочисленные эксперименты, которые выполнены, показывают, что это почти единственный в настоящее время перспективный способ генерации очень коротких радиоволн.

18. УСКОРИТЕЛИ В ХИМИИ

Органические вещества типа парафина, нефти и др. меняют свои свойства при облучении быстрыми электронами, причем эти изменения зависят как от энергии электронов, так и от их количества в потоке. При опытах с радиоактивными изотопами было получено множество различных модификаций органических соединений. Некоторые вещества улучшают свои механические свойства: повышается температура плавления, изменяется вязкость. При помощи изотопов, однако, трудно получить большие количества облученных материалов. На помощь приходит линейный электронный ускоритель, в котором можно получить достаточное количество быстрых электронов. Все опыты по изучению изменений облученных органических веществ дают основание предполагать, что в недалеком будущем возникнет новая

отрасль химии, изучающая свойства таких веществ. Тогда линейные электронные ускорители окажутся основными приборами для получения органических веществ с новыми свойствами.

19. ЗАЩИТА ОТ ВРЕДНОГО ВЛИЯНИЯ УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ЖИВОЙ ОРГАНИЗМ

Любые быстро летящие заряженные частицы, попадая в организм человека или животного, разрушают его, причем это разрушение сначала внешне ничем не проявляется и не чувствуется организмом, но последствия его гибельны. Человек, подвергшийся воздействию ускоренных частиц, заболевает так называемой лучевой болезнью. Эта болезнь поражает человека также при взрыве атомной или водородной бомбы. При этой болезни разрушаются кровяные тельца, нарушается питание тканей, а в клетках происходит ионизация атомов, и клетки гибнут. Поэтому весьма важную роль решительно при всех опытах с ускоренными частицами играет служба защиты от их вредного влияния.

Действенным способом защиты от вредных излучений является постройка стен и укрытий из плотных материалов, таких, как бетон и металлы, особенно свинец. Расчеты и опытные данные показывают, что для предотвращения воздействий частиц на человека при ускорении их до сотен миллионов электроновольт необходимы бетонные стены толщиной в несколько метров. Обычно здание, в котором помещается ускоритель, делается со стенами такой толщины, чтобы совершенно обезопасить работающий персонал от лучевой болезни. Так, например, защитная бетонная стена у фазотрона Объединенного института ядерных исследований (СССР) с энергией протонов 680 *Мэв* имеет толщину 8 *м*.

В некоторых случаях для защиты применяются водяные баки несколько большей толщины, чем бетонные стены.

Металлические стены делать экономически невыгодно, и поэтому металлические защитные стенки используются редко и главным образом в ускорителях с малой энергией частиц (до нескольких миллионов электроновольт). Они выполняются в виде небольших экранов.

Для большей защиты от ускоренных частиц у тех мест зданий, где из ускорителя выпускаются частицы, за пределами зданий насыпаются холмы земли, а зона около холмов объявляется опасной.

К службе защиты относятся также приборы, оповещающие о наличии ускоренных частиц. Такие приборы устанав-

ливаются во всех помещениях около ускорителя и при их помощи можно определять степень опасности помещения для человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кроме рассмотренных выше способов ускорения заряженных частиц, имеется еще один, предложенный чл.-корр. АН СССР В. И. Векслером. Этот способ называется когерентным ускорением заряженных частиц. Идея этого метода заключается в том, что при взаимодействии очень компактных сгустков двух родов частиц, например электронов и протонов с разными энергиями, можно осуществить ускорение частиц, имеющих малую энергию. В сгустках частиц возникают сверхсильные электрические поля, которые и ускоряют другие частицы. Так, в сгустке электронов с достаточно большой энергией можно ускорить сгусток протонов. Сгусток электронов должен иметь очень большое число частиц в весьма малом объеме, что само по себе — трудно осуществимая задача. Взаимодействие между сгустками частиц может иметь место или в виде удара двух сгустков, или при их параллельном движении. Пока имеются только общие теоретические положения этого метода ускорения.

Мы рассмотрели применение радиотехники и электроники в ускорителях, в основном с точки зрения получения ускоряющих напряжений, а также частично в схемах управления блоками ускорителей.

В заключение надо добавить, что роль радиотехники и электроники в управлении ускорителями, синхронизации работы отдельных блоков этих ускорителей и различных вспомогательных приборов гораздо больше и важнее, чем следует из нашего краткого описания. Особенно велико их значение в синхрофазотронах, где сложные радиоэлектронные блоки с десятками и сотнями радиоламп являются как бы «мозгом» ускорителя.

Многие приборы для физических исследований, применяемые в ускорительной технике, по сути дела являются радиоэлектронными приборами. Многие физические опыты вообще нельзя было бы провести без этих приборов.

Можно смело заявить, что без применения радиотехники и электроники сооружение и работа ускорителей невозможны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер В. И., Ускорители атомных частиц, Изд. Академии наук СССР, Москва, 1956.

2. Ливингстон М. С., Ускорители, Изд. иностранной литературы, Москва, 1956.

3. Журнал „Атомная энергия“ 1956, № 4.

4. Журнал „Техника молодежи“, 1956, № 1—2 и 8.

5. По высокочастотным устройствам ускорителей обзорная статья А. Л. Минца в журнале „Радиотехника и электроника“, 1956, № 5; № 7 этого журнала целиком посвящен радиоустройствам 6-метрового фазотрона и синхрофазотрона на 10 млрд. *эв*.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 1 р. 45 к.